

MARCELLO ATTILIO GRACIA

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO EM ÓLEOS LUBRIFICANTES
DE ROLAMENTOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DO ÓLEO E DA
ASSINATURA DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia

São Paulo

2003

MARCELLO ATTILIO GRACIA

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO EM ÓLEOS LUBRIFICANTES
DE ROLAMENTOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DO ÓLEO E DA
ASSINATURA DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Linilson Rodrigues Padovese
Prof. Associado

São Paulo
2003

À querida Rose e minhas filhas Maria Clara e Marília, que entre tantas outras coisas, abdicando de
minha companhia, contribuíram de maneira fundamental para que eu conseguisse concluir este

cobiçado projeto. Muito obrigado, meninas !

*"Hoje eu quero apenas, uma valsa de mil compassos
Para ver as meninas, e nada mais nos braços"*

PARA VER AS MENINAS

Paulinho da Viola – Interp. Marisa Monte

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a mim mesmo. Me parablenizo. Uma meta traçada que tinha que ser atingida. Um objetivo almejado que teve início há cerca de dez anos atrás. Uma escolha que acima de tudo demandou esforços e desprendimentos imensuráveis, só possíveis de serem avaliados por quem de fato se propôs a enfrentá-los. Investimentos totalmente recompensados pelo saboroso prazer de poder dizer, com incontida alegria e auto-orgulho: Deu certo ! Eu consegui ! Eu cheguei lá !

A Deus agradeço por conduzir-me neste caminho, principalmente nos momentos de fraqueza e insegurança, auxiliando a retomar minha serenidade, a minha concentração e a minha força de vontade que tanto me foram úteis ao longo dessa empreitada.

Ao Professor Linilson, por muitas coisas, mas principalmente pela oportunidade concedida e pela confiança depositada em mim e no teor da pesquisa.

Aos colegas do LFS – Laboratório de Fenômenos de Superfície, que me auxiliaram no início e no final deste trabalho.

Aos colegas do Ladin – Laboratório de Análises Dinâmicas e Instrumentação da Poli, formado por Rui Gomes, Rodrigo Fujimoto, Elvys Cury, Wilson Carlos, Claudia Serna, Silmara Vicente, Luiz Fernando Rocha e Marcos Irmão (PB), em especial ao Rui, por sua importantíssima ajuda e apoio no Matlab além de discussões gerais sobre os sinais de vibrações.

À NSK pela cortesia na cessão dos rolamentos de teste e pelas valiosas informações prestadas pelo Eng. Marcos Campanha.

Ao prof. Dr. Henrique Kahn e sua equipe, do LCT da Eng. de Minas e do Petróleo, pelas importantes orientações para a preparação tanto dos contaminantes sólidos como para as amostras de óleos contaminados.

À Hydac pelas discussões sobre contagem de partículas em óleos.

À Márcia Marú, crítica e incentivadora, agradeço entre outras coisas pelas profundas e proveitosas abordagens sobre lubrificação e seus fenômenos.

Ao amigo Baroni pelas produtivas discussões sobre resíduos de desgaste.

Ao prof. Pedro Stulgys, que com sua morte repentina em junho deste ano, observa de algum outro lugar a conclusão deste trabalho.

À Fundação CAPES pelo parcial suporte financeiro desta pesquisa, através do projeto nº 0136/01-8 PROCAD “Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Sistemas Mecânicos”.

À todas as pessoas que de uma forma ou de outra se envolveram comigo durante todo esse tempo, seja apoiando, sugerindo, criticando, questionando, enfim agradeço sinceramente pelos momentos compartilhados e pelas contribuições recebidas.

RESUMO

Dentro dos campos de desenvolvimento da lubrificação proativa de componentes de máquinas, a possibilidade de detecção antecipada da contaminação de lubrificantes têm ganhado cada vez interesse entre usuários e fabricantes de máquinas. Este trabalho sugere a possibilidade de se avaliar a contaminação de origem física em óleos lubrificantes de mancais de rolamentos lubrificadas por banho através de técnicas que correlacionam o grau de contaminação com a assinatura dos sinais de vibração, comparando dados de óleos lubrificantes isentos de partículas com outros contaminados. Para tanto, foram realizadas aquisições simultâneas do nível de contaminação ISO 4406 e dos sinais de vibrações de rolamentos em banhos de óleo limpo e contaminados. Executaram-se comparações do nível de contaminação com o RMS dos sinais em diversas faixas de frequências. São feitas também avaliações envolvendo os efeitos de diversos tamanhos e concentrações de contaminantes nas folgas internas, rugosidades, impactos nas superfícies e avaliação dos resíduos de desgaste encontrados nos óleos. Algumas hipóteses dos mecanismos de contato que podem ocorrer no contato pista-esfera-contaminante são realizadas. O estudo sugere que existe a possibilidade efetiva de se detectar níveis diferenciados de contaminação em óleos através da análise da assinatura de sinais de vibrações.

ABSTRACT

In what concerns the development of proactive lubrication in machine components, there has been an increasing interest, in the last years, in earlier lubricant contamination detection. This work suggests the possibility of evaluating physical contamination of lubricant oils in lubricated rolling bearings, employing techniques that correlate the degree of contamination with the vibration signal signatures and comparing data from lubricants particle-free oils with that from contaminated ones. In order to accomplish this objective, simultaneous acquisition of ISO 4406 contamination level and of bearing vibration signals, in both clean oil baths and contaminated oil baths, were made. The contamination level was compared with the signal RMS in several frequency bands. In addition, this study evaluates the effects of different contamination concentration and particle size in internal bearing clearances as well as those of roughness and impact on surfaces. It also evaluates the wear residues found in the oils. Some hypotheses on the contact mechanisms governing the interaction races-balls-contaminant-lubricant are proposed. The study suggests that there is an effective possibility of detecting oil contamination levels by analyzing the vibration signal signatures.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2	CONTEXTO DO ESTUDO.....	6
2.1.	Introdução.....	6
2.2.	Contaminação, desgaste e perdas tribológicas.....	6
2.3.	Contaminação sólida em óleos lubrificantes.....	7
2.4.	Impactos da contaminação nas vibrações.....	8
2.5	Objetivos do trabalho.....	8
2.5.1	Geral.....	8
2.5.2.	Específicos.....	8
2.5.3.	Justificativas.....	13
2.6.	Organização do trabalho.....	14
3	MEDIÇÃO, AVALIAÇÃO E IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO EM LUBRIFICANTES.....	16
3.1.	A contaminação nos lubrificantes.....	16
3.1.1.	Tipos e fontes de contaminação.....	17
3.1.2.	Contaminantes sólidos.....	21
3.2	Técnicas de avaliação da contaminação e desgaste em óleos lubrificantes.....	24
3.2.1	Visão geral.....	24
3.2.2	Análises Físico Químicas.....	26
3.2.3.	Contagem de partículas.....	26
3.2.4	Análise de resíduos de desgaste.....	33

3.3. Efeitos da contaminação no desempenho dos rolamentos	37
4 PARTÍCULAS NO CONTATO DE LUBRIFICAÇÃO ELASTO HIDRODINAMICO	43
4.1.Introdução	43
4.2 A lubrificação de rolamentos	43
4.3 Regimes de lubrificação	45
4.4. Lubrificação Elasto hidrodinâmica	48
4.5.Espessura de filmes em lubrificação E-H.....	50
4.6.Partículas no contato de lubrificação E-H	51
4.6.1. Efeitos dos resíduos em contatos de lubrificação E-H.....	52
4.6.2. Experiências com aparelho ótico de lubrificação E-H.....	53
4.6.3. Conclusões.....	55
5 LUBRIFICAÇÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	56
5.1. Técnicas de detecção e monitoramento das condições dos componentes	56
5.2. Avaliação da lubrificação através de vibrações	58
5.2.1.Utilização de emissão acústica na detecção da lubrificação.....	60
5.2.2. Utilização de acelerometria na detecção da lubrificação	62
5.3.Monitoramento da contaminação em lubrificantes através de vibrações	63
6 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	66
6.1 Bancada de testes	66
6.2 Principais componentes da bancada.....	70
6.3.Contaminantes	71
6.4 Óleos lubrificantes e procedimentos de contaminação	79
6.5. Montagem do conjunto de teste.....	82

6.6. Cadeia de medidas.....	83
6.7. Procedimentos de ensaios.....	85
6.7.1. Início da aquisição de dados	85
6.7.2. Parâmetros de aquisição	85
6.7.3. Procedimentos de aquisição.....	90
6.7.4. Abordagens experimentais.....	92
6.8. Processamento de sinais.....	94
6.9. Avaliação das superfícies após ensaios	96
7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	99
7.1. 1.ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações realizadas em condição de lubrificante isento de contaminante	99
7.1.1. Resultados das medidas do nível ISO de contaminação pelo contador de partículas	99
7.1.2. Resultados do RMS da aceleração	102
7.1.3. Correlação de resultados entre nível ISO de contaminação e vibração	106
7.1.4. Discussão dos resultados	108
7.2. 2ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações utilizando óleos com contaminação controlada: tamanho de partícula variável e concentração constante	109
7.2.1. Resultados das medidas do nível de contaminação pelo contador de partículas	110
7.2.2. Resultados do RMS da aceleração	113
7.2.3. Correlação entre nível ISO de contaminação e vibração.....	117
7.2.4. Discussão dos resultados	119
7.3. 3ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações utilizando óleos com contaminação controlada: faixa de tamanho constante e concentração variável.....	124
7.3.1 Resultados das medidas do nível ISO de contaminação pelo contador de partículas	125
7.3.2 Resultados do RMS da aceleração	128
7.3.3. Correlação de resultados entre nível ISO de contaminação e vibração	138
7.3.4. Discussão dos resultados	142
7.4. 4ª Fase Experimental: Avaliação do comportamento da taxa de contaminação (g/l) X RMS da aceleração para óleos limpos e contaminados	149
7.4.1. Óleos sem contaminantes e com contaminantes menores que 20 µm ..	149
7.4.2. Discussão dos resultados	155
7.4.3. Óleos sem contaminantes e com contaminantes entre 75 e 53 µm.....	157

7.4.4. Discussão dos resultados	162
7.4.5. Avaliação do comportamento da carga radial: partículas menores que 20 μm e na faixa entre 75 e 53 μm	163
7.5. Avaliação das folgas radiais, rugosidades e superfícies	165
7.5.1. Avaliação das folgas internas	166
7.5.2. Avaliação das rugosidades superfícies	166
7.5.3. Avaliação das superfícies	168
7.6. Resultados das análise de resíduos de desgaste nos óleos	171
7.6.1. Resultados dos ensaios de espectometria	172
7.6.1. Resultados dos ensaios de ferrografia	175
8 CONCLUSÕES.....	179
9 TRABALHOS FUTUROS.....	182

REFERÊNCIAS

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1	Detalhes da formação da curva da banheira	3
Figura 1-2	Partículas contaminantes do fluido são laminadas dentro das folgas críticas	5
Figura 2-1	Partículas de contaminação encontradas num óleo novo	7
Figura 2-2	Primeiras indicações de problemas em rolamentos	10
Figura 2-3	Diagrama explicativo do fluxo de informações de contaminação através do uso da análise de resíduos do óleo e análise de vibrações	11
Figura 3-1	Porcentagem de causas de falhas de rolamentos	17
Figura 3-2	Porcentagem de componentes danificados por sujeira no lubrificante	18
Figura 3-3	Entalhamento de partícula dura num contato	21
Figura 3-4	Formas das partículas	23
Figura 3-5	Exemplos de contaminação de anel interno e externo de rolamentos com impurezas	24
Figura 3-6	Exemplo de anel externo de rolamento desgastado por partícula abrasiva e endentação por sujeira	24
Figura 3-7	Princípio de funcionamento de um contador de partículas óptico	28
Figura 3-8	Contador de partículas Hydac modelo FCU 2010	28
Figura 3-9	Dados de contagem de partículas plotados num gráfico log-log ²	29
Figura 3-10	Exemplos de contaminantes sólidos em lubrificantes vistos por ferrografia	37
Figura 3-11	Fluxo de lubrificante num rolamento de rolos	39
Figura 3-12	Mapeamento de regiões de dano e segura	41
Figura 4-1	Parâmetro de elipticidade em contato de lubrificação E H	50
Figura 4-2	Diagrama esquemático do processo pelo qual materiais cerâmicos frágeis entram em um contato de lubrificação E H	54

Figura 5-1	Pulsos de choque de vibrações da bomba de óleo de um compressor	60
Figura 5-2	Valores de “SEE” em função da película lubrificante	62
Figura 5-3	Valor de vibração X Tempo em função do tamanho do contaminante na graxa	64
Figura 5-4	Valor de vibração X Tipo e tamanho de contaminante	65
Figura 6-1	Esquema da bancada de teste – vista frontal	67
Figura 6-2	Esquema da bancada de teste – vista lateral	68
Figura 6-3	Bancada experimental	69
Figura 6-4	Conjunto mancal-garfo e reservatório do banho de óleo	70
Figura 6-5	Detalhe superior da bancada de testes	71
Figura 6-6	Duas das formas cristalinas do SiO ₂ , mostrando as ordenações dos tetraedros Si-O	73
Figura 6-7	Quartzo em lascas e após moagem	74
Figura 6-8	Resultados de análise de tamanho de partículas de quartzo < 20 µm	78
Figura 6-9	Resultados de análise de tamanho de partículas de quartzo entre 53 e 75 µm	79
Figura 6-10	Sistema de filtragem do óleo lubrificante	80
Figura 6-11	Cadeia de medidas	85
Figura 6-12	Aquecimento do banho de óleo por termostato	90
Figura 6-13	Registro da contaminação com contador de partículas	91
Figura 6-14	Folga interna do rolamento	97
Figura 6-15	Rugosidade Média (R _a)	98
Figura 7-1	Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X condição experimental sem contaminante (“sq”)	102
Figura 7-2	Gráfico de RMS SI X rotação do eixo – 3 cargas	103
Figura 7-3	Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – 3 cargas	104
Figura 7-4	Gráfico de RMS BF X rotação do eixo – 3 cargas	105
Figura 7-5	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – condição “sq”	107

Figura 7-6	Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X condição experimental “3d”	111
Figura 7-7	Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X condição experimental “7d”	112
Figura 7-8	Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X condição experimental “1d”	113
Figura 7-9	Gráficos de RMS SI X rotação do eixo – 3 cargas	114
Figura 7-10	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – 3 cargas	115
Figura 7-11	Gráficos de RMS BF X rotação do eixo – 3 cargas	116
Figura 7-12	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – condições “3d,7d,1d”	118
Figura 7-13	Detalhes da zona descarregada do rolamento	121
Figura 7-14	Partículas menores que a folga e filme lubrificante	122
Figura 7-15	Partículas maiores que a folga e filme lubrificante	123
Figura 7-16	Gráficos de RMS nas três faixas de frequência X rotação do eixo – 3 cargas	129
Figura 7-17	Gráficos de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg	130
Figura 7-18	Gráficos de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg	131
Figura 7-19	Gráficos de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg	132
Figura 7-20	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg	133
Figura 7-21	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg	134
Figura 7-22	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg	135
Figura 7-23	Gráficos de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg	136
Figura 7-24	Gráficos de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg	137
Figura 7-25	Gráficos de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg	138
Figura 7-26	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 36,58 kg	139
Figura 7-27	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 85,78 kg	140

Figura 7-28	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 136,45 kg	141
Figura 7-29	Possível mecanismo ocasionado por partículas de quartzo	144
Figura 7-30	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – condições “1a, 1b,1c”	147
Figura 7-31	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – condições “1d,1e,1f”	148
Figura 7-32	Gráficos de RMS SI, AF,BF X rotação do eixo – 3 cargas com óleo limpo	151
Figura 7-33	Gráficos de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo – 3 cargas sem óleo limpo	152
Figura 7-34	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg	153
Figura 7-35	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg	154
Figura 7-36	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 136,45kg	155
Figura 7-37	Endentamento de anel e achatamento de esfera	156
Figura 7-38	Posição da zona de carga do rolamento no mancal de teste	157
Figura 7-39	Gráficos de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo – 3 cargas com óleo limpo	158
Figura 7-40	Gráficos de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo – 3 cargas sem óleo limpo	159
Figura 7-41	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg	160
Figura 7-42	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg	161
Figura 7-43	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 136,45kg	163
Figura 7-44	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – contaminantes entre 0 e 20 μm com concentração conhecida –efeito da carga	164
Figura 7-45	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – contaminantes entre 75e 53 μm com concentração conhecida – efeito da carga	165
Figura 7-46	Fotos de esferas dos rolamentos	169
Figura 7-47	Gráfico de metais no óleo por espectrometria – condição “2g”	174
Figura 7-48	Gráfico de metais no óleo por espectrometria – condição “7g”	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1	Fontes de contaminantes em diversas situações	39
Tabela 3-2	Efeitos dos contaminantes por ação do meio	41
Tabela 3-3	Problemas de desgaste comumente relacionados a lubrificantes e óleos hidráulicos	43
Tabela 3-4	Forma das partículas	44
Tabela 3-5	Alocação dos números da escala	52
Tabela 3-6	Norma NAS 1638	55
Tabela 3-7	Correlação entre níveis de limpeza	56
Tabela 4-1	Sumário dos cinco principais regimes de lubrificação com espessuras típicas de filme e coeficientes de atrito	71
Tabela 5-1	Aplicação de controles e técnicas no acompanhamento de tipos de falhas e componentes	57
Tabela 6-1	Sequência de malhas de peneiras para classificação granulométrica do pó de quartzo	76
Tabela 6-2	Resultados da análise granulométrica do quartzo pulverizado	77
Tabela 6-3	Descrição das amostras de óleo utilizado nos experimentos	81
Tabela 6-4	Parâmetros experimentais	86
Tabela 6-5	Parâmetros para cálculo da espessura do filme de óleo	88
Tabela 6-6	Valores teóricos calculados de espessura de filme lubrificante para cada condição experimental	89
Tabela 7-1	Dados de aquisição para óleo sem contaminante	101
Tabela 7-2	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “3d”	110
Tabela 7-3	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “7d”	111
Tabela 7-4	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1d”	112
Tabela 7-5	Comportamento das partículas ao longo dos registros	120
Tabela 7-6	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1 a”	125

Tabela 7-7	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1b”	126
Tabela 7-8	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1c”	126
Tabela 7-9	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1d”	127
Tabela 7-10	Dados de aquisição para óleo com contaminante - condição “1e”	127
Tabela 7-11	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1f”	128
Tabela 7-12	Comportamento das partículas ao longo dos registros	143
Tabela 7-13	Valores de folga interna radial e nível de ruído	166
Tabela 7-14	Valores médios de rugosidade medidos após ensaios	167
Tabela 7-15	Novos cálculos de λ e regimes de lubrificação	168
Tabela 7-16	Micro fotos das esferas e pistas do rolamento	170
Tabela 7-17	Valores dos metais em ensaios de espectrometria no óleo	173
Tabela 7-18	Principais fotos dos ferrogramas das condições “2g” e “7g”	177

LISTA DE ABREVIATURAS

RMS	“Root Mean Square” ou Raiz Quadrática da Média Equivale a 0,707 x valor de pico	-
E H	Elasto – Hidrodinâmica (o)	-
ISO	Organização Internacional de Padronização	-
R _a	Rugosidade Média	μm

LISTA DE SÍMBOLOS

β_x	Classificação β_x de um filtro: n.o de partículas maiores que x microns antes do filtro / n.o de partículas maiores que x microns depois do filtro	-
μm	Mícron	10^{-6} m
λ	Relação entre espessura de filme lubrificante e rugosidade superficial dos corpos em contato	-
X	Nº de partículas $> 5 \mu\text{m}$	-
Y	Nº de partículas $> 15 \mu\text{m}$	-
D_L	Densidade de partículas $> 5 \mu\text{m}$	D_R / ml
D_s	Densidade de partículas $< 5 \mu\text{m}$	D_R / ml
L_{10}	Vida nominal dos rolamentos com 90 % de confiabilidade	hs ou revoluções
μ	Coefficiente de atrito	-
h_o	Espessura mínima do filme lubrificante	μm
σ_c	RMS composta das duas superfícies em contato	μm
σ_1	Rugosidade da superfície 1	μm
σ_2	Rugosidade da superfície 2	μm
$H_{\text{mín.}}$	Espessura de filme adimensional	-
k	Parâmetro de elipticidade	-
U	Parâmetro adimensional de velocidade	-
W	Parâmetro adimensional de carga	-
G	Parâmetro adimensional de materiais	-
d_i	Diâmetro Pista Interna	mm
d_o	Diâmetro Pista Externa	mm
d	Diâmetro da Esfera	mm
N	N.o de esferas	-
R_i	Raio Interno do Furo	mm

d_i	Diâmetro Pista Interna	Mm
d_o	Diâmetro Pista Externo	mm
d	Diâmetro da Esfera	mm
N	N.o de esferas	-
R_i	Raio Interno do Furo	mm
R_o	Raio Externo do Furo	mm
β	Ângulo de Contato	°
Δb	rms acabam. sup. das esferas	μm
Δa	rms acabam. sup. das pistas	μm
E	Módulo Elasticidade Pista Esfera	N/m^2
ν	Relação de Poisson Pista Esfera	-
η_o	Viscosidade Dinâmica	N.s/m^2
Y_o	Coefficiente Pressão Viscosidade	m^2/N
F_r	Carga Radial	N
B_i	Velocidade Angular Pista Interna	rad/s
B_o	Velocidade Angular Pista Externa	rad/s

1 INTRODUÇÃO GERAL

“...Eu fico com a pureza da resposta das crianças,

É a vida, é bonita e é bonita

Viver e não ter a vergonha de ser feliz,

Cantar e cantar e cantar

A beleza de ser um eterno aprendiz

Eu sei, que a vida devia ser bem melhor e será

Mas isso não impede que eu repita

É bonita, é bonita e é bonita”

O QUE É O QUE É

Música e interpret. de : Gonzaguinha

O acionamento confiável de componentes de precisão como rolamentos vem há muito tempo sendo objeto de estudo e pesquisa por fabricantes e usuários. Ioannides, Beghini, Jacobson (1993) reportam que melhorias nos métodos de produção e mais particularmente, na redução das inclusões nos aços dos rolamentos, além de melhorias de projeto, fabricação e programas de qualidade assegurada, aumentaram o desempenho e a confiabilidade dos rolamentos. Em uso, entretanto, modernos rolamentos podem perder as vantagens dessas melhorias através de danos que atinjam a superfícies das pistas ou dos corpos rolantes. Ou seja, rolamentos ainda falham devido a mecanismos envolvendo fenômenos de superfície. Hutchings (1992) cita entre eles o *pitting*, a fadiga de início de superfície e vários modos de desgaste que envolvem defeitos na superfície original dos componentes, relacionados tanto a lubrificação inadequada, contaminação por partículas abrasivas, ou ainda devido a resíduos de desgaste.

Neste texto, o termo *pitting* ou *pits* será sempre referenciado como um tipo de desgaste caracterizado pela presença de cavidades na superfície formada por processos como fadiga, adesão local ou cavitação (ASM Handbook, 1992).

Ioannides, Jacobson (1989) relatam que a cerca de 40 anos atrás, os ensaios com rolamentos de esferas eram realizados através da lubrificação a graxa, tornando-se difícil eliminar-se dos rolamentos as partes desprendidas pelo desgaste e pelas contaminações.

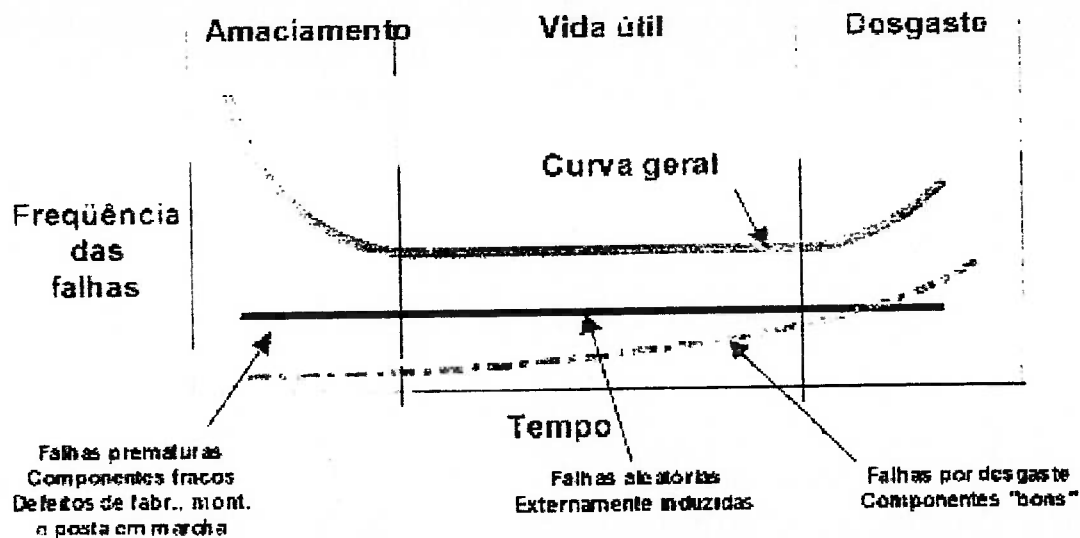
Há cerca de dez anos, critérios anteriormente ignorados como lubrificação e condições de contaminação do lubrificante, passaram a ser considerados fundamentais na expectativa de vida de rolamentos.

Práticas de controle da contaminação de lubrificantes podem ser incorporadas a diversas fases da lubrificação industrial, desde a aquisição e transporte dos lubrificantes, o correto armazenamento e aplicação inicial no ponto, passa por rigorosos controles de relubrificação isentos de contaminantes, até os procedimentos de troca de óleo e monitoramento da lubrificação. Entre as práticas existentes capazes de manter sob controle a contaminação dos óleos lubrificantes, podemos citar a instalação adequada de filtros absolutos para lubrificantes com elevada taxa de retenção (aqueles com pelo menos relação $\beta_x \geq 75$ e baixa micragem) e um adequado programa de monitoramento da contaminação e desgaste dos lubrificantes.

A contaminação está diretamente relacionada com a expectativa de vida de uma máquina. Wowk (1991) apresenta a chamada curva da banheira, aplicada ao ciclo de vida de um equipamento, onde registra três fases distintas, chamadas de mortalidade infantil, operação normal e fase de obsolescência.

Correlação similar faz Stulgys (2001), que apresenta um outro modelo de curva da banheira, mostrada na figura 1-1.

Percebe-se pelo gráfico 1-1, que a região da curva chamada de **amaciamento**, correspondente a seta localizada no lado esquerdo inferior da figura 1-1, é aquela caracterizada por falhas prematuras, que atacam componentes fracos, são oriundas de defeitos de fabricação e montagem e que ocorrem durante a posta em marcha de equipamentos. Observa-se pelo gráfico que essa taxa de falhas é inicialmente elevada e depois passa a ser decrescente. Como consequência natural, as falhas devido a **sujeiras, impurezas e contaminações diversas encontradas nos lubrificantes** costumam se manifestar nessa fase.



**Figura 1-1 Detalhes da formação da curva da banheira
(Stulgys, 2001)**

O estudo aqui apresentado envolverá a utilização de duas técnicas preditivas ligadas a lubrificação e a contaminação de lubrificantes, que são a análise de óleos usados, (ênfase em ensaios de contagem de partículas e análise de resíduos de desgaste) e a análise de vibrações de rolamentos, principalmente através de medições comparativas dos valores de RMS da aceleração.

É sabido que contaminantes físicos podem, dependendo de suas características, tamanhos e quantidade, modificar as condições de lubrificação, tanto degradando propriedades físico-químicas dos lubrificantes, como na forma de partículas abrasivas, potencializar processos de desgaste.

Em consulta realizada a usuários de lubrificantes, fabricantes de lubrificantes e filtros, tribologistas, profissionais de análises preditivas por análises de óleo e vibrações e finalmente a pesquisadores acadêmicos, a unanimidade das respostas revelou ser forte a suposição que a contaminação de origem sólida tendia a incrementar o nível de vibração de rolamentos em banho de óleo. Referência bibliográfica consultada, envolvendo contaminação sólida em graxas, (Komya, 1992) confirma essas predições.

Nesse contexto, surgem questões que pretendemos investigar e discutir neste trabalho, tais como:

- A contaminação em óleos de rolamentos intensifica ou atenua a assinatura do sinal de vibrações de rolamentos?

- O nível de contaminação de óleos medidos pela norma ISO 4406 têm alguma relação com o nível de vibração medido?
- O tamanho e a concentração das partículas de contaminação influenciam numa eventual correlação contaminação-vibrações?
- O tempo de operação contínua de um rolamento e as condições de agitação do banho têm influência nos sinais de vibração com óleos contaminados ?
- Partículas de contaminação em condição de lubrificação Elasto-Hidrodinâmica (que neste texto quando citada será abreviada como E-H) podem amortecer vibrações mecânicas de rolamentos?
- Contaminantes no óleo em curto espaço de operação modificam a superfície de trabalho dos componentes dos rolamentos ?
- Técnicas de análise de resíduos de desgaste presentes em óleos podem descrever o comportamento de contaminantes em contatos lubrificados?
- As duas técnicas utilizadas podem ter a mesma efetividade na detecção de problemas do contaminação numa fase primária ?

A figura 1-2 procura ilustrar o momento em que contaminantes sólidos entram em contato com a superfície de trabalho dos rolamentos. Através de condições experimentais previamente fixadas, presume-se que partículas contaminantes quando em contato com a zona de carga sejam esmagadas e/ou laminadas. Esse comportamento será estudado para um determinado tipo de contaminante, variando-se seu tamanho e concentração. Registros da contaminação através da norma ISO 4406 serão realizados. Sinais de vibrações dos rolamentos serão simultaneamente registrados e posteriormente comparados, inicialmente com a contaminação e posteriormente com sinais de óleos limpos. Pretende-se observar e discutir comparativamente os resultados, tanto do comportamento da contaminação como de sua influência nos sinais de vibrações.

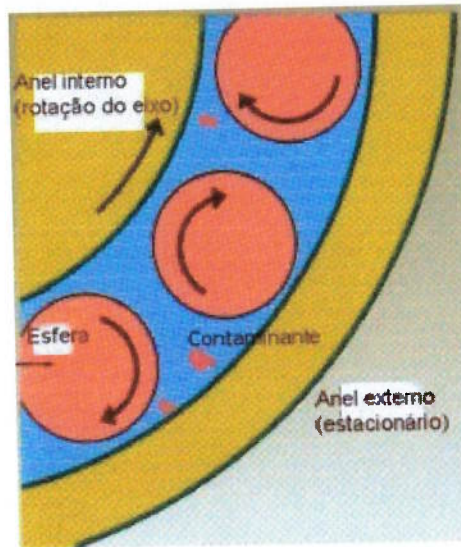


Figura 1-2 Partículas contaminantes do fluido são laminadas dentro das folgas críticas (Vickers, 1996) * adaptado e traduzido pelo autor

O trabalho em si possui algumas limitações práticas e experimentais que fazem com que alguns pontos sejam impossíveis de serem avaliados. A principal delas é que sendo rolamentos componentes de geometria precisa e comportamento dinâmico complexos, não há como se avaliar o que realmente acontece com partículas contaminantes na região de carga do rolamento. Vários fenômenos podem ocorrer de forma isolada ou conjunta. Não há como precisar se partículas se alojam no interior da espessura do filme lubrificante, se são moídas e em seguidas laminadas na zona de carga, ou se ainda se movimentam aleatoriamente entre as esferas, pistas e gaiolas na região oposta, que se mantém descarregada. Algumas dessas possibilidades serão abordadas e discutidas ao longo do trabalho.

A partir de resultados experimentais que retratam algumas dessas condições, pretende-se discutir os resultados obtidos dentro de abordagens práticas e teóricas, sugerindo prováveis hipóteses que tenham ocorrido nos fenômenos e nos resultados que foram observados.

A questão da contaminação física do lubrificante e seus impactos na lubrificação e nas vibrações dos rolamentos será portanto a principal vertente deste trabalho.

2 CONTEXTO DO ESTUDO

2.1. Introdução

Para um bom entendimento da leitura, apresentamos um contexto inicial para conhecimento do escopo do trabalho e quais pontos que serão abordados. Neste capítulo falaremos brevemente sobre impactos da contaminação na tribologia, com ênfase para a contaminação de origem sólida, correlações entre contaminação, desgaste e vibrações além dos objetivos e justificativas do estudo.

2.2. Contaminação, desgaste e perdas tribológicas

Bloch (2000) relata que a contaminação de sistemas circulatórios de óleo é responsável por significativos números e tipos diferentes de falhas em máquinas. Allen (1989) *apud* Bloch (2000) reporta a viabilidade de operações de *flushing*¹ em turbinas a gás documentadas em escala mundial por plantas químicas, as quais têm mantido em serviço 22000 galões de óleo americanos por mais de dez anos, sem substituição da carga por nenhuma planta. O *flushing*¹ inicial numa posta em marcha de um equipamento considerado crítico é considerado um método completo, seguro e essencial para aumentar a disponibilidade global dos equipamentos.

A questão da contaminação têm forte vínculo com problemas tribológicos, entre eles a lubrificação. Segundo Ball (1998), dados relatados da Fundação para Estratégia da Indústria indicam que os custos anuais de manutenção na Austrália eram cerca de 30 a 50 % maiores que os das empresas européias e japonesas, e 15 % superiores aos das Norte Americanas. Esses custos poderiam ser diretamente relacionados com desgaste e reposição de peças, mas também com a perda de produção e paradas não programadas. Durante a metade dos anos 80, esses custos foram cautelosamente estimados na Austrália como sendo cerca de 6 % do Produto Interno Bruto, ao passo que para o ano 2000 estimava-se que boas práticas tribológicas (entre elas o controle da contaminação) poderiam economizar cerca de 3 bilhões de dólares em um ano.

¹ *flushing*: operação de lavagem de sistema no interior de tubulações, com fluido a elevadas velocidades, com N.o Reynolds \geq 4000), conforme norma NFPA/T2.9.9, 1979

2.3. Contaminação sólida em óleos lubrificantes

Vickers (1996) aponta quatro fontes primárias de contaminação sólida em lubrificantes:

- Contaminação do óleo novo, verificada através da foto mostrada na figura 2-1;
- Contaminação remanescente da construção e montagem ;
- Ingresso de contaminantes no sistema;
- Contaminação gerada internamente pela máquina.



Figura 2-1 Partículas de contaminação encontradas num óleo novo: aumento de 100 X.(Vickers, 1996)

A publicação explica que se fluidos novos forem mantidos em condições razoáveis de armazenamento, os principais contaminantes presentes serão metais, sílica e fibras. Amostras de óleos sem uso tomadas de embalagens de fornecedores de marca apresentaram níveis de contaminação ISO 4406 (1987) igual a 17/16/14, que dependendo da aplicação podem dar início imediato a processos de desgaste em componentes sensíveis. A codificação ISO, que costuma ser reportada pelo ensaio de Contagem de Partículas, será melhor explicada no item 3.2.3..

Vickers (1996) também relata que contaminantes são encontrados em várias formas e tamanhos, e são constituídos por uma larga variedade de materiais. A maioria são abrasivos, uma vez que quando interagem com as superfícies, eles riscam e cortam fragmentos de superfícies críticas de componentes.

A questão da contaminação sólida em lubrificantes será melhor discutida no item 3.1.

2.4. Impactos da contaminação nas vibrações

Poucas correlações entre presença de contaminantes em contatos lubrificados e impactos nas vibrações dos rolamentos são encontradas na literatura. Hutchings (1992) escreve que sempre que superfícies se movem umas contra as outras, em detrimento ao desgaste outros fenômenos podem ocorrer nos contatos. Ele cita aumento de folgas entre componentes em movimento, graus de liberdade indesejáveis e perda de precisão, vibração frequente, aumento de carregamentos mecânicos e desgaste ainda mais rápido, além do que em algumas vezes falha por fadiga.

Um resumo do material bibliográfico pesquisado será apresentado através da revisão bibliográfica realizada no item 5.2.

2.5 Objetivos do trabalho

Os objetivos do trabalho são classificados em duas categorias:

2.5.1 Geral

O objetivo deste projeto de mestrado é o de se avaliar a contaminação de origem física em óleos lubrificantes de rolamentos e seus impactos na assinatura dos sinais de vibração .

2.5.2.Específicos

Constituem objetivos específicos do trabalho:

- Investigar correlações entre nível de contaminação ISO 4406 de um óleo lubrificante com os sinais globais de vibração dos rolamentos;
- Estudar e avaliar se existem limitações na correlação entre esses dois métodos de análise;
- Investigar se os sinais de vibrações de um rolamento lubrificado em banho de óleo com contaminação conhecida variam com o tempo de operação contínua do componente nesse meio;
- Avaliar se existem metodologias que permitam uma confiável e eficiente correlação entre os dois métodos, a partir de parâmetros pré fixados;
- Investigar se para condições de contaminação conhecida, carga e rotação modificam as vibrações dos rolamentos;

- Através de análise comparativa, observar se informações de contaminação e sinais de vibrações podem ser associados a alterações na folga interna, rugosidade, marcas superficiais e presença de resíduos de desgaste no óleo;
- Discutir a efetividade da detecção de condições de operação anormais em rolamentos operando em óleos lubrificantes contaminados, fazendo uso da técnica de análise de vibrações e da técnica de análise de resíduos de desgaste;

A questão de qual das técnicas representa maior efetividade na detecção de falhas de componentes ainda envolve certa polêmica no meio da manutenção preditiva. Garvey (2001) em seu artigo expõe um pouco de sua experiência em programas de monitoramento preditivo utilizando os conceitos de RCM (manutenção centrada em confiabilidade). O autor coloca que a análise de vibração têm oferecido maior efetividade para tipos de máquinas mais complexos como compressores de ar centrífugos e a aparafuso, “blowers”, caixas de engrenagem com múltiplos estágios, motores de corrente alternada e contínua, turbo-geradores e máquinas ferramentas. Por outro lado, o autor registra que equipamentos como compressores de ar, motores a diesel e de combustão interna, prensas e bombas hidráulicas a pistão, não poderiam ainda ser adequadamente monitoradas apenas por análise de vibrações. A análise de óleo teria detectado certos problemas com algumas máquinas anteriormente ao surgimento de um alarme por vibrações, principalmente em caixas de engrenagens de múltiplos estágios, mancais de deslizamento, compressores de parafuso, sopradores e alguns mancais de rolamento.

O autor faz interessante correlação entre os diagnósticos mais frequentes detectados por análise de vibrações e correlaciona os quatro estágios de falha dominantes em rolamentos (Charlotte, 1996 *apud* Garvey, 1997) e suas eventuais correlações com resíduos de desgaste observados por técnicas de ferrografia (Berry, 1999 *apud* Garvey, 1999). A figura 2-2 registra aquele que seria o estágio inicial de falha em um rolamento.



Figura 2-2 Primeiras indicações de problemas em rolamentos
(Charlotte 1996 *apud* Garvey, 1997) * adaptado e traduzido pelo autor

O autor registra também as seguintes colocações:

- “Quando as duas técnicas estão “amarradas” dentro do mesmo programa de monitoramento, as fraquezas de uma técnica podem ser compensadas pelo fortalecimento da outra”;
- “Quando ambas as técnicas detectam o mesmo problema, a diagnose e as recomendações seguintes são raramente imprecisas”;
- “Um programa combinado das técnicas torna-se mais efetivo que as somas das efetividades das técnicas de formas isoladas”.

O diagrama da figura 2-3 sugere como se manifesta a relação entre a presença de contaminantes em lubrificantes e possíveis impactos no desempenho dos rolamentos, partindo-se da premissa que as duas técnicas preditivas estariam disponíveis (análise de óleo e análise de vibrações), e que o tempo de utilização do componente na condição contaminada foi pequeno.

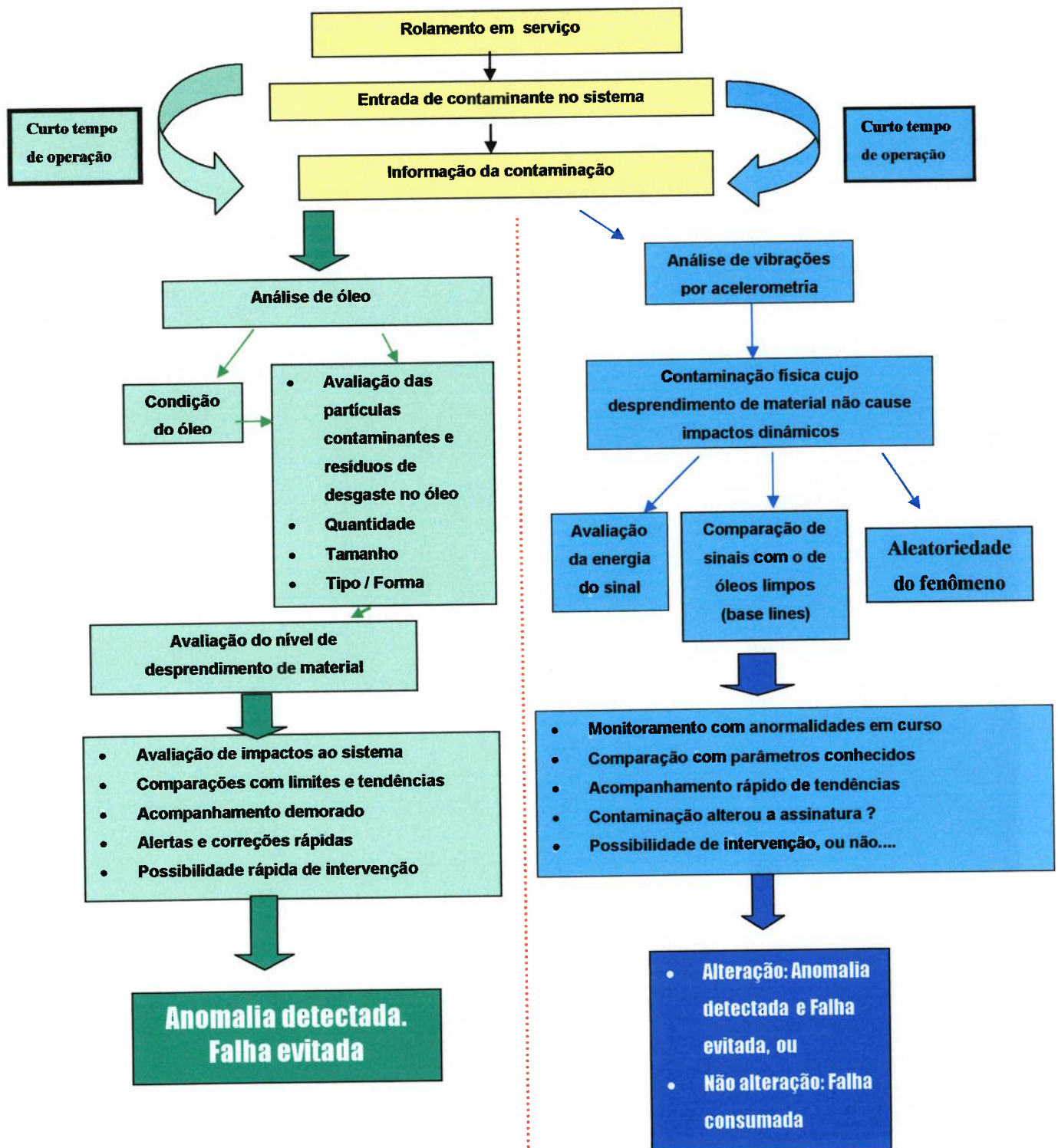


Figura 2-3: Diagrama explicativo do fluxo de informações de contaminação através do uso de análise de resíduos do óleo e análise de vibrações

O diagrama da figura 2-3 sugere duas formas de como a contaminação em óleos lubrificantes de rolamentos pode ser investigada.

O diagrama considera um rolamento em serviço operando numa condição inicial, com curto tempo de operação. Supondo-se que haja entrada de contaminantes no sistema a informação da contaminação poderia ser detectada através de análise de óleo. Isto geralmente se faz através da tomada de uma amostra do óleo lubrificante. Laboratórios portáteis ou especializados podem ser utilizados, conforme a necessidade e a criticidade. No laboratório, além de serem cheçadas as principais características físicas e químicas do óleo, serão investigados os resíduos de desgaste presentes no óleo, avaliando se esse contaminante têm tamanho, quantidade e morfologia potenciais para provocar uma anomalia na condição do componente

Supondo-se uma situação onde o contaminante está presente mas ainda não ocasionou um desprendimento expressivo de material do rolamento. É razoável supor que a ferramenta análise de resíduos de desgaste irá identificar e quantificar adequadamente a contaminação, sendo eficaz para diagnosticar uma eventual alteração na condição do contato contaminante-rolamento. Isto é, a análise de óleo diz que o óleo está sujo, informa com precisão o tipo e o tamanho da sujeira, informa a magnitude dos resíduos de desgaste do rolamento que já foram gerados e é capaz de oferecer dados para uma tomada de ação preventiva rápida antes que esse contaminante seja o causador de uma falha catastrófica no rolamento. Resultado da metodologia conduziria para a detecção da anomalia e não ocorrência da falha.

Vejamos agora o mesmo monitoramento fazendo uso da acelerometria através da análise de vibrações. Mesmo com pequeno tempo de operação a ferramenta é capaz de monitorar dinamicamente o rolamento e registrar rapidamente a assinatura de seus sinais de vibrações. Supondo que existam históricos disponíveis do rolamento operando em condições de óleo lubrificante limpo, pode se fazer por comparação, uma avaliação precisa das características do sinal. A contaminação do lubrificante poderia ser assim identificada e juntamente com todas as outras avaliações possíveis, seria possível detectar com razoável precisão uma situação anormal de contaminação e até monitorá-la por algum tempo, predizendo com alguma antecedência o momento provável da alteração da condição do contato lubrificado.

Entretanto, se a contaminação não alterasse de forma expressiva a assinatura dos sinais de vibração, a possibilidade de intervenção ficaria prejudicada e a anormalidade presente no lubrificante fatalmente conduziria o componente para uma falha catastrófica.

Ao decorrer do trabalho veremos de que forma essa contaminação afeta a assinatura dos sinais de vibrações e a formação dos resíduos de desgaste.

2.5.3. Justificativas

A primeira justificativa deste trabalho é de caráter pessoal, pois reflete um pouco da vivência e experiência do pesquisador na área de lubrificantes, lubrificação e monitoramento preditivo de componentes industriais, na qual atua há 13 anos.

Sabe-se que normalmente a detecção de problemas de contaminação em lubrificantes é demorada, pois em geral, demanda metodologia e procedimentos específicos para coleta, envio e análises de óleo em laboratórios, diagnose e emissão de laudos nem sempre conclusivos. Anon (1987) registra que nos Estados Unidos, custos podem variar desde U\$ 7,00 por amostra para algumas análises de óleos de motor, até mais de U\$ 100,00 por amostra para alguns extensos programas aplicados em óleos hidráulicos. O tempo envolvendo envio de amostra e realização de testes costuma variar entre 3 e 10 dias. Há situações onde esse intervalo é extremamente elevado, principalmente em máquinas críticas e sensíveis, onde muitas vezes quando esse tipo de problema é diagnosticado, a degradação do fluido, os desgastes de componentes e falhas catastróficas já estão em curso, inviabilizando de certo modo a eficiência na tomada de ações corretivas.

Isto faz com que algumas vezes investimentos preditivos em análise de óleos se tornam inviáveis, pois não conseguem ser amortizados e justificados em curto espaço de tempo.

Inexiste hoje no mercado uma ferramenta que consiga apurar com confiabilidade e a tempo real, simultaneamente a contaminação de um lubrificante e seu grau de comprometimento dinâmico ao componente. Uma eventual correlação de análises envolvendo a contaminação de lubrificantes com a técnica de análise de vibrações seria preciosa e serviria como base para a tomada de decisões mais confiáveis.

Sabendo-se que o desempenho dos óleos lubrificantes em serviço é fortemente influenciado por contaminações diversas, o trabalho tentará avaliar e identificar eventuais correlações com vibrações que se manifestem devido a presença maior ou menos contaminação física no óleo.

Além disso, o trabalho conta com um caráter de ineditismo tecnológico, visto que até o momento não existem registros efetivos de trabalhos envolvendo a correlação e a interação precisa destas duas técnicas preditivas.

Sabe-se que adoção de estratégias de detecção antecipada de contaminantes na lubrificação de componentes têm sido valorizadas pela indústria. A possibilidade do desenvolvimento de uma metodologia eficiente de correlação entre informações de contaminação de lubrificantes e a respectiva análise de sinais de vibrações adquire assim caráter inovador.

2.6. Organização do trabalho

A idéia do trabalho foi de se realizar uma revisão profunda de tópicos envolvendo contaminação, lubrificação de rolamentos e técnicas preditivas de detecção de contaminação em óleos, com ênfase em análise de vibrações para em seguida, de posse dos resultados da parte prática, tentar se buscar referências que pudessem ter correlação com os fenômenos observados.

Dessa forma, o primeiro capítulo, como foi visto, tratou de introduzir resumidamente o tema.

Este capítulo, denominado “Contexto do estudo”, pretende situar e abordar rapidamente os tópicos gerais da pesquisa, tratando a respeito dos impactos tribológicos da contaminação no meio industrial, rolamentos em condição E-H, exemplos de contaminação sólida em lubrificantes, além de descrever os objetivos do trabalho e suas justificativas.

O capítulo 3 abordará especificamente a contaminação nos lubrificantes e as técnicas utilizadas para medir e avaliar essa contaminação.

O capítulo 4 se destina a abordar o comportamento de partículas em contatos elasto-hidrodinâmicos.

O capítulo 5 abordará uma revisão de literatura direcionada para a utilização de técnicas que utilizem vibração para diagnosticar anormalidades de lubrificação e contaminação.

O capítulo 6 refere-se a toda a parte experimental do trabalho, abordando os detalhes da metodologia utilizada, desde o preparo dos materiais, os procedimentos de ensaios, registros e aquisições, a cadeia de medidas além do processamento dos sinais.

Dando continuidade ao texto, o capítulo 7 foi destinado a mostrar e discutir os resultados experimentais e os principais gráficos e tabelas relativas à parte experimental.

No capítulo 8 serão resumidas as principais conclusões obtidas no trabalho.

Por fim o capítulo 9 se destina a sugerir outros pontos da pesquisa que possam vir a ser abordados em uma futura continuidade do presente trabalho.

3 MEDIÇÃO, AVALIAÇÃO E IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO EM LUBRIFICANTES

Esta capítulo visa dar uma visão geral de vários conceitos relacionados com a contaminação de lubrificantes e suas influências, métodos de medição da contaminação e avaliação dos resíduos de desgaste através de análise de óleos usados. Finalmente será abordado como a contaminação afeta o desempenho nos rolamentos.

3.1. A contaminação nos lubrificantes

Contaminantes podem ser partículas sólidas, líquidos, ou gases de qualquer tipo que causam mudanças químicas ou físicas nos sistemas. Godfrey, Herguth (1996) definiram contaminante como qualquer material não originário do óleo novo, ou que é gerado dentro do sistema ou nele ingressa.

Segundo Godfrey (1989), estima-se que cerca de 70 a 85 % das falhas e problemas de desgaste em máquinas lubrificadas são causadas pela contaminação nos óleos. Contaminantes diminuem a vida das máquinas, especialmente aquelas com acabamentos e folgas apertadas e que operam a elevadas velocidades e temperaturas. A manutenção de óleos limpos agrega os seguintes benefícios:

- Estende a vida da máquina;
- Aumenta a confiabilidade e a produtividade;
- Diminui custos de manutenção;
- Aumenta a vida do óleo;
- Permite a utilização de óleos de menor viscosidade.

Em função do objetivo da pesquisa, nos próximos tópicos será dada maior ênfase aos impactos da contaminação dos lubrificantes em componentes por meio sólido e abrasivo.

3.1.1. Tipos e fontes de contaminação

Glantz (1992) fornece dados interessantes sobre a contaminação existente em lubrificantes para rolamentos e caixas de engrenagens. Em uma investigação entre as empresas que fazem parte do conselho de pesquisa alemão (FVA) para a tecnologia de acionamentos, foi mostrado que 90 % das companhias participantes atribuíam a problemas tribológicos as causas de falhas em seus mancais. Esta investigação foi concentrada em redutores industriais lubrificadas por sistema de circulação ou banho de óleo. O gráfico da figura 3-1 apresenta os resultados da investigação.

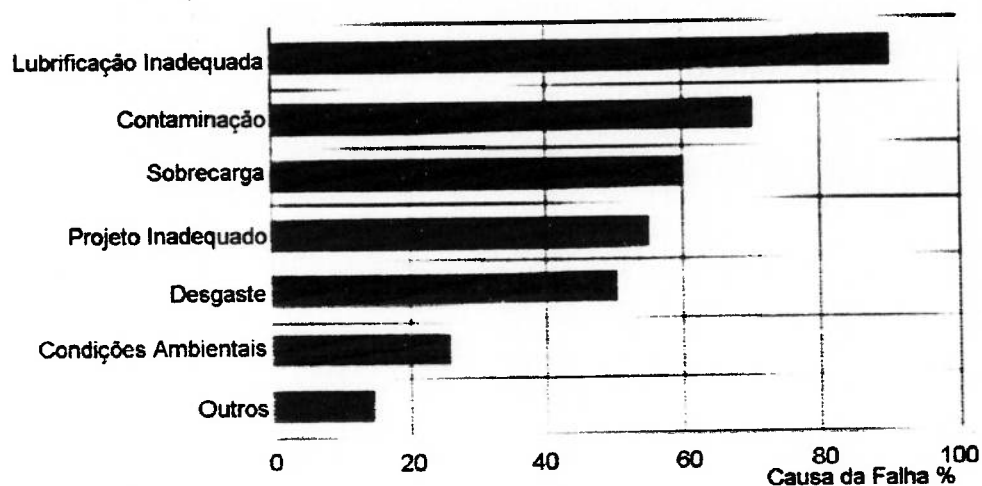


Figura 3-1 Porcentagem de causas de falhas de rolamentos

(Glantz, 1992) * adaptado e traduzido pelo autor

Em 70 % dos casos, as causas da falha dos rolamentos foi atribuída ao ingresso de sujeira. A mesma investigação mostrou que rolamentos foram os componentes mais frequentemente danificados pela contaminação do lubrificante., com cerca de 28% dos casos.

A figura 3-2 apresenta graficamente esses resultados.

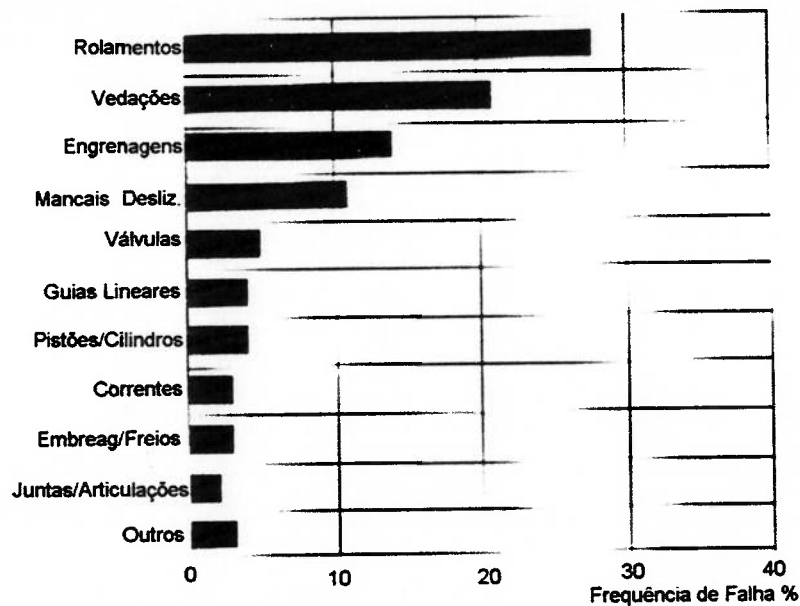


Figura 3-2 Porcentagem de componentes danificados por sujeira no lubrificante (Glantz, 1992) * adaptado e traduzido pelo autor

Glantz (1992) coloca que em geral, as fontes de contaminação de rolamentos podem ser divididas em três grupos:

1. Contaminantes primários, os quais são originados dos processos de fabricação e montagem, assim como do enchimento inicial com óleo lubrificante novo. A água é um contaminante primário cuja presença em óleos lubrificantes pode diminuir a vida dos rolamentos a abaixo de 1 % ou menos, dependendo da quantidade presente;

2. Contaminantes secundários, partículas produzidas durante os amaciamentos, que se desprendem durante a posta em marcha, partículas que são introduzidas ao lubrificante durante as manutenções, assim como produtos de oxidação resultantes do envelhecimento do lubrificante;

3. Contaminantes externos, os quais adentram através dos orifícios dos respiros inadequadamente dimensionados ou por vedações danificadas, como também durante reparos executados inadequadamente.

Segundo ele, para uma completa análise dos contaminantes em sistemas lubrificadas, devem ser determinados:

- a forma e a aparência das partículas;
- a quantidade e a distribuição de tamanho das partículas;
- a composição química dos contaminantes.

Também a respeito de contaminantes gerados durante a operação de componentes, encontra-se em Parker (1998), que os mesmos seriam gerados por seis diferentes modos de desgaste, ou seja, desgaste abrasivo, por cavitação, por fadiga, erosivo, adesivo e corrosivo.

Godfrey (1989) sugere através da tabela 3-1 as principais fontes de contaminação encontradas em ambientes industriais:

Tabela 3-1: Fontes de contaminantes em diversas situações

(Godfrey, 1989) * adaptado e traduzido pelo autor

FONTES DE CONTAMINANTES EM		
ÓLEO SEM USO	MÁQUINAS NOVAS E REPARADAS	MÁQUINAS EM OPERAÇÃO
<ul style="list-style-type: none"> . Fabricação do óleo . Finos de catálise, debris de containers, fibras . Manuseio . Sujeira de limpeza e estocagem mal realizada . Containers contaminados . Água de containers abertos . Adição de óleo errado 	<ul style="list-style-type: none"> . Resíduos de fundição . Restos de soldas . Escamas e areia . Produtos de corrosão . Fibras . Resíduos de usinagem . Restos de abrasivos . Cavacos . Restos de vidro . Solventes . Água 	<ul style="list-style-type: none"> . Gerados . Fragmentos de desgaste . Produtos de corrosão . Partículas de borracha . Fragmentos de plásticos . Produtos de oxidação do óleo . Produtos de hidrólise dos aditivos . Introduzidos . Sujeira . Água, fluidos refrigerantes, combustível . Contaminantes do óleo novo . Processamentos químicos

O autor também cita que partículas metálicas e principalmente os íons ferro e cobre são catalizadores da oxidação dos óleos, sendo que seus ácidos orgânicos corroem metais e formam lodos e vernizes.

No mesmo artigo, Godfrey (1989) descreve três tipos de contaminantes e seus efeitos nos lubrificantes líquidos, conforme tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Efeitos dos contaminantes por ação de meio (Godfrey, 1989)

* adaptado e traduzido pelo autor

EFEITOS DOS CONTAMINANTES POR		
Meio Sólido	Meio Líquido	Meio Gasoso
<p>Partículas duras, maiores que 3 μm</p> <ul style="list-style-type: none"> . Desgaste abrasivo, severo, adesivo, "scuffing", fadiga de contato . Aumento do atrito; . Quebra do filme de óleo 	<ul style="list-style-type: none"> . Fadiga de contato . Corrosão . Quebra do filme de óleo . Redução da viscosidade . Promove oxidação do óleo . Formação de borra . Degradação de aditivos . Incompatibilidade de óleos 	<ul style="list-style-type: none"> . Aeração . Espuma . Cavitação . Corrosão . Aumento da compressibilidade . Quebra do filme de óleo . Promove oxidação do óleo
<p>Partículas moles, menores que 3 μm</p> <ul style="list-style-type: none"> . Formação de borra e ferrugem; . Redução do fluxo de óleo; . Desgaste por polimento; . Quebra do filme de óleo; . Aumento do atrito; . Promovem oxidação do óleo; . Provocam retenção de ácidos. 		

Da tabela 3-2 o autor destaca os efeitos representados pelos contaminantes sólidos, inicialmente os representados tanto por partículas duras, como a areia, compostos de retífica, metais e óxidos metálicos, cujo tamanho sendo maior que a espessura do filme lubrificante causa desgaste abrasivo a três corpo, onde a ação de corte produzirá fragmentos metálicos perigosos.

Partículas metálicas podem atravessar folgas , aumentando a adesão entre metais levando ao *scuffing* e a falhas catastróficas. Partículas duras também endentam e se entalham nas superfícies dos rolamentos, criando picos de tensão, trincas e deslocamentos, diminuindo a vida a fadiga, conforme figura 3-3. Neste texto, o termo *scuffing* quando citado deverá ser interpretado como uma forma de desgaste que produz riscos superficiais ou um alto polimento das superfícies em contato (MetalsHandbook, 1985).

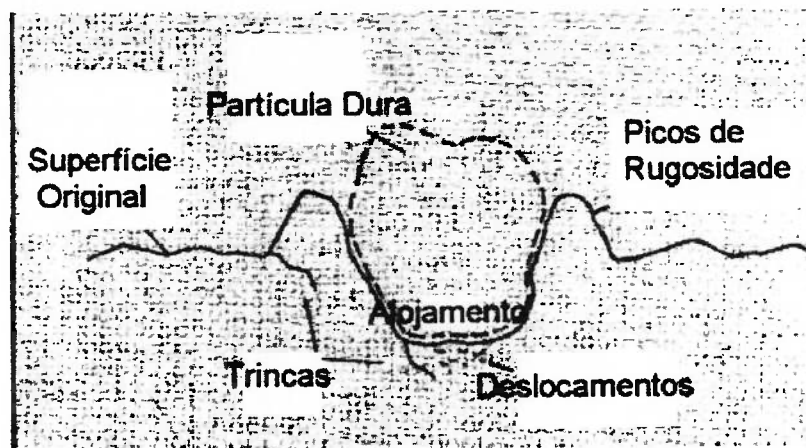


Figura 3-3 Entalhamento de partícula dura num contato
(Needleman 1980 *apud* Godfrey 1989) * adaptado e traduzido pelo autor

Partículas pequenas e menos duras também provocam desgaste, principalmente na presença de agentes ácidos corrosivos, presentes em alguns óleos usados, podendo causar polimento.

3.1.2. Contaminantes sólidos

A influência negativa dos contaminantes sólidos nos componentes de máquinas é conhecida. Existem diversas referências que relacionam confiabilidade e longa vida a boas práticas de manutenção de lubrificantes sempre limpos e secos. Por óleo lubrificante seco entende-se um óleo que avaliado pelo método de Karl Fischer (ASTM D 1744) apresente no máximo 300 ppm de água dissolvida. Certamente a pior consequência da contaminação sólida nos lubrificantes é o desgaste.

Em uma das referências consultadas, Godfrey (1987) faz pequeno histórico de autores que se dedicaram a definir os modelos clássicos de modo de desgaste.

Ele apresenta uma tabela bastante completa onde correlaciona os diversos modos de desgaste com sua definição, partes suscetíveis das máquinas onde ocorrem, condições operacionais para a ocorrência do desgaste, aspectos das superfícies a olho nu, aspectos microscópicos, detecção através de análise de óleo e aspectos relativos a como prevenir a ocorrência dos mesmos, abordando mudanças mecânicas e do lubrificante.

Os principais modos de desgaste são citados na tabela 3-3.

Tabela 3-3 Problemas de desgaste comumente relacionados a lubrificantes e óleos hidráulicos (Godfrey, 1987)

* adaptado e traduzido pelo autor

Modo de desgaste	Componentes	Modo de desgaste	Componentes
Adesão moderada	Todos	Corrosão	Todos os rolamentos, paredes de cilindros, engrenagens, vedações
Adesão severa	Anéis de pistão, mancais de rolamento e deslizamento, engrenagens, ferramentas de corte, vedações, correntes	Corrosão por "Fretting"	Máquinas vibradoras, contatos de alojamento de mancais, parafusos
Abrasão	Todas as superfícies em movimento relativo	Eletrocorrosão	Válvulas hidráulicas de aviões, bombas e motores hidráulicos
Erosão	Mancais de deslizamento, válvulas	Descargas elétricas	Rolamentos em altas velocidades, máquinas rotativas como compressores, atomizadores
Polimento	Furos de cilindros de motores, engrenagens	Danos por cavitação	Partes hidráulicas, bombas, válvulas, dentes de engrenagens, cilindros e anéis de pistão
Fadiga de contato	Mancais de rolamento e deslizamento, engrenagens		

Outra referência importante sobre a presença de contaminantes sólidos em rolamentos é encontrada em Ville(1998), que estudou efeitos da endentação e fadiga de superfície por eles provocados. Hunt (1993) *apud* Ville (1993) sugere a divisão em sete classes de partículas sólidas encontradas em lubrificantes, cujos tamanhos variam de 1 até no máximo 2 μm . Elas são mostradas na figura 3-4 e definidas na tabela 3-4, designadas pelos números das classes, sendo a classe 1 referente a figura ao alto e a classe 7, referente a figura inferior do conjunto:

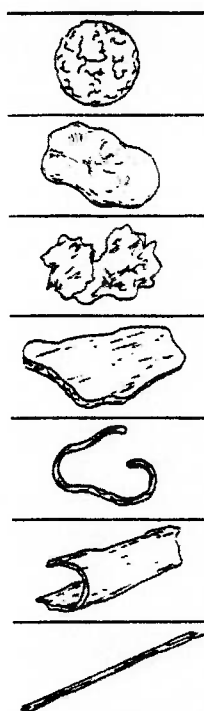


Figura 3-4: Forma das partículas (Hunt 1993 *apud* Ville 1993)

* adaptado e traduzido pelo autor

Tabela 3-4: Nome e origem das partículas (Hunt 1993 *apud* Ville 1993)

Classe	Forma	Origem
1	Esferas	Aglomeración e fusão de resíduos metálicos de desgaste
2	Partículas lisas deformadas e ovaladas galets)	Pós introduzidos do exterior (quartzo, silício, etc..)
3	Pedaços grandes empedrados	Partículas metálicas, produzidas pela fadiga de superfície
4	Plaquetas e cascas	Partículas metálicas produzidas devido a rodagem ou do desgaste normal
5	Anéis, tiras e lamelas	Partículas produzidas da usinagem ou por trabalhos da superfície
6	Rolos	Partículas na forma de tiras ou cascas
7	Cordões e fibras	Partículas não metálicas em geral geradas de uma atmosfera poluída

Partículas sólidas visualizadas pelo método de ferrografia serão mostradas no item 3.2.4.2.

Retiradas de NSK (2001) e SKF (1988), são mostradas em seguida duas fotografias, apresentadas nas figuras 3-5 e 3-6, típicas de componentes de rolamentos danificados por impurezas sólidas.

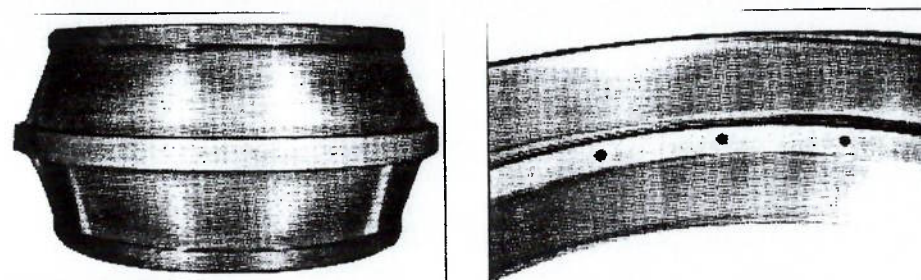


Figura 3-5 Exemplos de contaminação de anel interno e anel externo de rolamentos com impurezas sólidas (NSK, 2001)

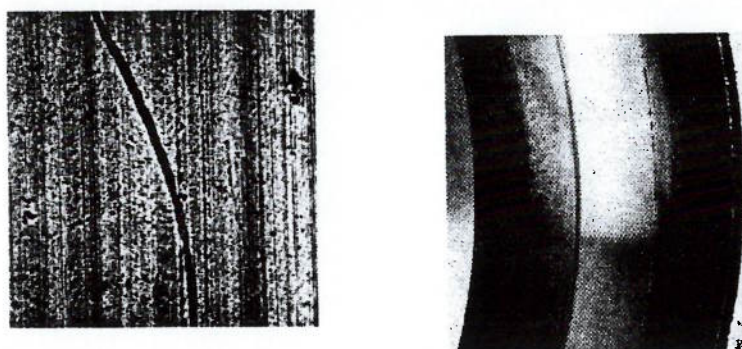


Figura 3-6 Exemplo de anel externo de rolamento desgastado por partícula abrasiva(esq.) e endentação por sujeira(dir.)(SKF,1999)

3.2 Técnicas de avaliação da contaminação e desgaste em óleos lubrificantes

A seguir serão abordadas algumas das técnicas mais utilizadas para a avaliação da contaminação em óleos lubrificantes.

3.2.1 Visão geral

Scott (1970) descreve em seu artigo que falhas tribológicas associadas a rolamentos envolvem na maioria das vezes elevados custos e paradas de produção imprevistas, acarretando elevadas perdas operacionais. Faz extensa descrição de métodos usados na investigação de componentes falhados, citando a inspeção visual, avaliação de detalhes construtivos além de uso de técnicas mais refinadas, como avaliação por microscópio ótico e interferometria, além de testes de microdureza, micrografia, avaliação dos contaminantes e de espessuras de filmes lubrificantes.

Também relata que a contaminação no lubrificante por material estranho pode indicar manutenção em filtros. Sugere que em casos onde a espectrometria não se justifica, a simples colocação de bujões magnéticos nos drenos das máquinas podem indicar a existência de mecanismos de desgaste. Por fim, registra que o desempenho de mancais pode vir a ser facilmente detectável por temperatura, vibrações e registros acústicos, no entanto simples alertas precisam ser rapidamente investigados para que não se transformem em manutenções corretivas de emergência.

Será apresentado a seguir uma breve revisão de técnicas usuais de análise de óleos que foram utilizados na parte experimental do trabalho: análises físico-químicas, contagem de partículas, e avaliação dos resíduos de desgaste, através das técnicas de espectrometria e ferrografia.

Lockwood; Dalley (1992) colocam que a análise de óleo e das partículas de desgaste para a determinação da condição do lubrificante compreende tanto a inspeção física como o exame químico dos resíduos de desgaste, dos contaminantes e dos produtos de reação dos lubrificantes para motores, fluidos hidráulicos, fluidos de corte, graxas e em fluidos sinoviais de seres humanos e animais. Uma vez que o desgaste é uma inevitável e antecipada consequência do contato superficial entre partes de máquinas que interagem como eixos, mancais, engrenagens e buchas em sistemas adequadamente lubrificados, a análise das partículas de óleo e de resíduos de desgaste podem potencialmente ser aplicadas para todos os equipamentos lubrificados.

Os autores colocam que os mais comuns testes físicos que são solicitados em conjunto com a espectrometria e a análise de metais de desgaste são a avaliação da viscosidade, do número de acidez total e a determinação do teor de água. Métodos ASTM são normalmente utilizados nesses ensaios, sendo comum utilizar a ASTM D 445 para viscosidade, a ASTM D 974 ou 664 para a acidez e a ASTM D 1744 para determinação de baixas concentrações de água pelo método de Karl Fischer.

Anon (1987) faz importantes considerações sobre critérios a serem adotados em programas periódicos de monitoramento por análise de óleos usados. Entre eles podemos destacar, coletas periódicas, tempos rápidos para a chegada e análise da amostra pelo laboratório, coleta de óleo se possível com a máquina em funcionamento, identificação correta da amostra, método e ponto de coleta

padronizados, purga e limpeza prévia do ponto de coleta ou utilização de bomba sugadora com mangueira plástica, frasco com limpeza certificada, informações detalhadas da aplicação, envio de óleo novo para comparação, seleção adequada dos ensaios na amostra, correta diagnose e interpretação dos resultados, se possível utilizando dados estatísticos, limites e tendências.

3.2.2 Análises Físico Químicas

Wiseman; Ah-Sue (1992) reportam em seu artigo a utilização do espectro de infravermelho como ferramenta confiável para detectar a degradação de lubrificantes e a presença de contaminantes não metálicos, através da comparação com espectros de óleos lubrificantes novos, recurso esse bastante usual na indústria.

Sasaki et al (1989) elaboraram artigo a respeito da identificação de contaminantes em óleos hidráulicos de injetoras fazendo-se uso de ensaios comparativos dos espectros infravermelhos dos lubrificantes.

Runge; Duarte (1989) e Carreteiro, Moura (1998) tecem explicações sobre diversos ensaios físico químicos disponíveis para a avaliação tanto de óleos lubrificantes novos (sem uso), como para produtos em uso e especiais. Informam sugestões de seqüências de ensaios em lubrificantes em serviço a serem utilizados no monitoramento de alguns componentes encontrados em equipamentos industriais.

Em relação a identificação de contaminação sólida, também o teste de insolúveis em n-heptano em membrana (ASTM D 4055, ABNT P-MB 325) costuma ser bastante utilizado para indicar o percentual em peso de materiais insolúveis que possam ser separados facilmente por misturas de óleo e solvente através de centrifugação.

3.2.3. Contagem de partículas

Lockwood, Dalley (1992) descrevem que o ensaio de contagem de partículas é largamente utilizado para monitorar sistemas hidráulicos, onde partículas de desgaste maiores que 10 μm são de principal interesse. Relatam que esse ensaio é mais adequado quando mecanismos de fadiga são os modos de falha primários, ou quando partículas contaminantes causam abrasão. Este cenário, onde λ ou relação entre espessura do filme lubrificante e a rugosidade da superfície excede

aproximadamente 1, é passível de ser evitado pelo monitoramento por contagem de partículas ou detecção de partículas por plugs magnéticos.

A questão da avaliação da contaminação em óleos lubrificantes é descrita por Yamaguchi et al. (2002), que registra a existência de dois padrões para o registro da limpeza em lubrificantes. O primeiro, baseada na contagem de partículas, segue as normas NAS 1638, ISO 4406, SAE AS4059 e JIS B9930, pode informar o número de partículas em certas faixas de tamanho. O outro método, chamada de análise gravimétrica, segue as normas ASTM D 4898 e JIS B9931, mede o peso bruto do contaminante em um certa quantidade de fluido. No entanto, em ambas as técnicas não se consegue saber com exatidão quais são esses contaminantes. Em função dos produtos de oxidação de contaminantes serem de tamanho molecular, e portanto de difícil avaliação pelos métodos tradicionais, os autores desenvolveram uma técnica de investigação da cor de contaminantes coletados através de membranas de filtros. Através da utilização de “scanner” de alta resolução e feixes de luzes sobre as membranas, mapearam em coordenadas cartesianas os contaminantes contidos nas membranas em função das cores fundamentais vermelho, verde e azul. Após técnicas de lavagem com solventes, concluíram que a cor marrom que permanecia nas membranas indicava a presença de produtos de oxidação.

Eleftherakis; Shelton; Long (1995) registram em seu artigo que a remoção completa de partículas sólidas de óleos hidráulicos ou de laboratório é extremamente difícil de ser obtida.. Apesar de que em muitas aplicações a isenção total de contaminantes não ser uma necessidade, a maioria dos sistemas não têm ou têm insuficiente controle sobre a contaminação. A inspeção visual de frascos de amostra contra a luz não pode oferecer uma medida real da contaminação. Mesmo porque a visão humana é incapaz de distinguir partículas menores que 40 μm de tamanho. Colocam também que processos manuais para a contagem microscópica de contaminantes apesar de básicos, são demorados e suscetíveis a erros de medição.

Por isso, foram introduzidos os contadores automáticos de partículas, que são instrumentos dotados de sensores óticos que fazem cruzar através do óleo feixes de luz branca ou laser. Um sensor posicionado no lado oposto ao fluxo do fluido, registra a intensidade da variação da luz que colidem com as diferentes partículas que passam através dela. Um fator crítico no uso e aplicação de qualquer resultado de

contagem de partículas é a certeza que o contador esteja consistentemente calibrado, de modo reproduzível, sendo reconhecido pela norma ISO 4402. Além disso, a presença de água ou espuma na amostra podem comprometer a leitura dos resultados.

A figura 3-7, retirada de Stulgys (1998), ilustra o princípio de funcionamento de um contador de partículas que opera com sensor óptico de escurecimento.

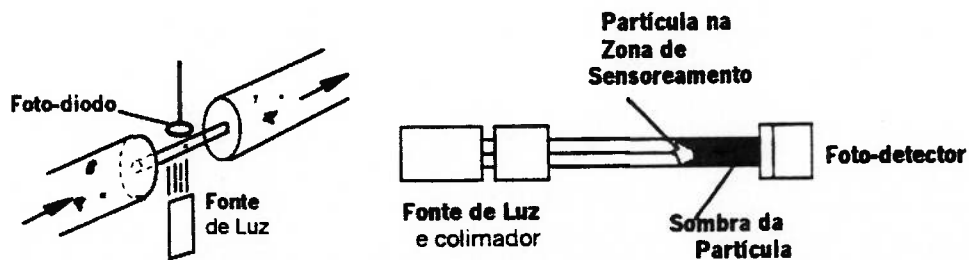


Figura 3-7: Princípio de funcionamento de um contador de partículas óptico (Stulgys, 1998)

A figura 3-8 ilustra um contador de partículas automático que funciona pelo método a laser, e que foi utilizado em algumas das aquisições experimentais durante a parte prática deste trabalho.

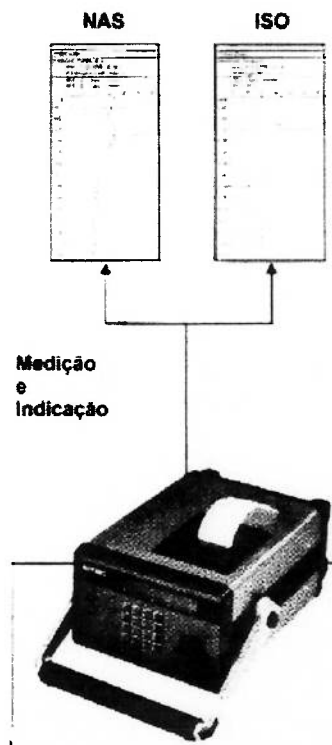


Figura 3-8: Contador de partículas Hydac modelo FCU 2010 (Hydac, 2002)

Eleftherakis; Shelton; Long (1995), registram a criação na Suécia em 1987 do código ISO 4406, um método internacionalmente aceito para a codificação do nível de contaminação de fluidos em aplicações industriais.

A norma ISO 4406 abrange dois códigos, X e Y, onde X representa o nível de partículas maiores que 5 microns (μm) e Y representa o nível de partículas maiores que 15 microns (μm), conforme gráfico log-log², mostrado na figura 3-9.

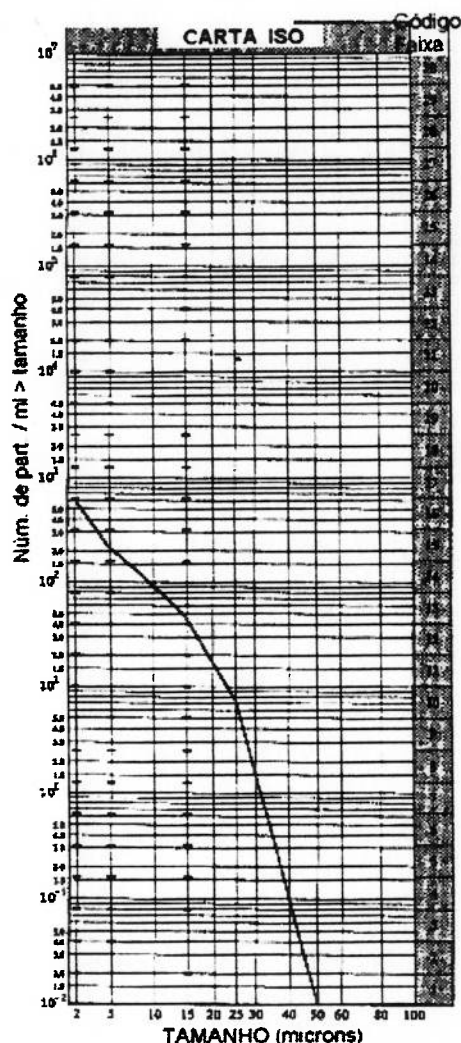


Figura 3-9 Dados de Contagem de Partículas plotados num gráfico log-log² com as coordenadas do Código ISO (Eleftherakis, Shelton, Long, 1995)

* adaptado e traduzido pelo autor

Os autores colocam que algumas organizações estenderam os dois padrões convencionais de medição e incorporaram um terceiro nível de contaminação ($> 2 \mu\text{m}$) a ser utilizado em sistemas de lubrificação com elevada criticidade. Conforme se observa na figura 3-9, se os valores de contaminação referentes aos tamanhos

forem plotados num gráfico log-log², será possível avaliar-se o comportamento geral da contaminação de um fluido em todas as suas faixas de contaminação.

Retirada de ISO 4406 (1999), mostramos através da tabela 3-5, as faixas de códigos ISO que variam de 1 a 28 e representam a análise de partículas contadas de 0,01 a 2.500.000 partículas por mililitro de fluido.

Tabela 3-5: Alocação dos números da escala (ISO 4406, 1999)

* adaptado e traduzido pelo autor

Número de partículas por mililitro		Número da escala
Maior que	Menor que e até	
2500000		28
1500000	750000	29
900000	450000	30
500000	250000	31
300000	150000	32
180000	90000	33
100000	50000	34
60000	30000	35
35000	18000	36
20000	10000	37
12000	6000	38
7000	3500	39
4000	2000	40
2500	1200	41
1500	700	42
900	400	43
500	250	44
300	150	45
180	90	46
100	50	47
60	30	48
35	18	49
20	10	50
12	6	51
7	3.5	52
4	2	53
2.5	1.2	54
1.5	0.7	55
0.9	0.4	56
0.5	0.25	57
0.3	0.15	58
0.18	0.09	59
0.1	0.05	60
0.06	0.03	61
0.035	0.018	62
0.02	0.01	63
0.01	0.005	64
0.005	0.0025	65

Segundo a ISO 4406 (1999), o objetivo deste código é simplificar a informação dos dados de contagem de partículas através da conversão do número de partículas em classes amplas ou códigos, nas quais o aumento de um código equivale a duplicação do nível de contaminação.

Com a criação dos contadores ópticos automáticos de partículas, as faixas de tamanhos de partículas tiveram que ser modificadas. Na revisão da norma, executada em 1999, os novos tamanhos informados pelo equipamento deveriam ser $\geq 4 \mu\text{m}\text{C}$, $\geq 6 \mu\text{m}\text{C}$ e $\geq 14 \mu\text{m}\text{C}$, os dois últimos destes sendo equivalentes aos antigos valores de $5 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$ usados na antiga norma. O método de calibração do equipamento também foi alterado, sendo que o uso da notação $\mu\text{m}\text{C}$ significa que medições do tamanho da partícula foram realizadas utilizando um contador de partículas automático, o qual foi calibrado de acordo com a norma de calibração ISO 11171.

A norma ISO 4406 (1999) revisada explica como se determina a contaminação de um óleo fazendo-se uso de um contador automático de partículas. O primeiro número da escala deverá representar o número de partículas iguais ou maiores do que $4 \mu\text{m}\text{C}$. O segundo número da escala deverá representar o número de partículas iguais ou maiores do que $6 \mu\text{m}\text{C}$. O terceiro número da escala deverá representar o número de partículas iguais ou maiores do que $14 \mu\text{m}\text{C}$. Os três números deverão ser escritos um após o outro e separados por um traço transversal. Por exemplo, um óleo lubrificante que apresentou um código ISO 22/18/13, significa que:

- existem mais do que 20.000 e até no máximo 40.000 partículas iguais ou maiores que $4 \mu\text{m}\text{C}$;
- existem mais do que 1.300 e até no máximo 2.500 partículas iguais ou maiores que $6 \mu\text{m}\text{C}$;
- existem mais do que 40 e até no máximo 80 partículas iguais ou maiores que $14 \mu\text{m}\text{C}$ em 1 ml de uma amostra de óleo;

Apesar da norma específica de contadores de partículas ópticos automáticos especificarem a medição de partículas $>$ que 4 , 6 e $14 \mu\text{m}\text{C}$, na prática essa determinação não é aplicada. A maioria dos aparelhos ópticos existentes no mercado, inclusive o utilizado na parte experimental deste trabalho reportam resultados conforme a norma ISO 4406 de 1987, ou seja, medem partículas > 5 , > 15 e $> 25 \mu\text{m}$.

O próprio contador automático de partículas utilizado na parte experimental deste trabalho reportou 5 faixas de tamanho de partículas:

- $> 2 \mu\text{m}$, $> 5 \mu\text{m}$, $> 15 \mu\text{m}$, $> 25 \mu\text{m}$ e número total de partículas em 100 ml de fluido.

Em Glantz (1992), é citado que para a determinação de graus de limpeza de fluidos hidráulicos e lubrificantes é também possível fazer uso da norma NAS 1638 (National Aerospace Standard), mostrada através da tabela 3-6. Esta norma possui 14 diferentes classes de limpeza baseadas em 100 ml de fluido. Cada classe especifica um dado número de partículas em cada um dos cinco grupos: de 5 a 15 μm , 25 a 50 μm , 50 a 100 μm e maior que 100 μm . No entanto, a norma ISO 4406 é mais freqüentemente usada.

Tabela 3-6. Norma NAS 1638 (NAS 1638, 1964)

* adaptado e traduzido pelo autor

Classe NAS	Número de partículas por 100 ml					Quantidade de contaminação (ACFTD)	
	2 - 5 μm	5 - 15 μm	15 - 25 μm	25 - 50 μm	50 - 100 μm	> 100 μm	[ppm]
00	525	25	2	4	1	0	-
0	1.250	250	44	6	2	0	0,01
1	2.500	500	88	12	3	1	-
2	5.000	1.000	178	32	5	1	-
3	10.000	2.000	356	63	11	2	-
4	20.000	4.000	712	126	22	4	0,1
5	40.000	8.000	1.425	253	45	8	-
6	80.000	16.000	2.850	506	90	16	0,2
7	160.000	32.000	5.700	1.012	180	32	0,5
8	320.000	64.000	11.400	2.025	360	64	1
9	640.000	128.000	22.800	4.050	720	128	3
10	1.280.000	256.000	45.600	8.100	1.440	256	6
11	2.560.000	512.000	91.200	16.200	2.880	512	7 1/2
12	5.120.000	1.024.000	182.400	32.400	5.760	1.024	20
13	-	2.048.000	364.800	64.800	11.520	2.048	40
14	-	4.096.000	729.600	129.600	23.040	4.096	80

Glantz (1992) cita que não existe uma relação direta entre as norma NAS 1638 e ISO 4406. A comparação só pode ser realizada quando a NAS 1638 é convertida na forma acumulativa. Encontra-se na SAE J 1165 (1979) uma tabela de correlação entre as diversas metodologias de contagem do nível de contaminantes em fluidos, conforme mostrado na tabela 3-7.

Tabela 3-7 Correlação entre níveis de limpeza (SAE J 1165, 1979)

* adaptado e traduzido pelo autor

Código ISO	Partículas por mi > 10 um	ACFTD Nível Gravim. mg/l	Padrão MIL 1246 A (1967)	NAS 1638 (1964)	Nível SAE (1963)
26/23	140 000	1000			
25/23	85 000		1000		
23/20	14 000	100	700		
21/18	4500			12	
20/18	2400		500		
20/17	2300			11	
20/16	1400	10			
19/16	1200			10	
18/15	580			9	6
17/14	280		300	8	5
16/13	140	1		7	4
15/12	70			6	3
14/12	40		200		
14/11	35			5	2
13/10	14	0,1		4	1
12/9	8			3	0
11/8	5			2	
10/8	3		100		
10/7	2,3			1	
10/6	1,4	0,01			
9/6	1,2			0	
8/5	0,8			00	
7/5	0,3		50		
6/3	0,14	0,001			
5/2	0,04		25		
2/1,8	0,01		10		

A interpretação do resultado de contagem de partículas têm interesse prático para estabelecer níveis de limpeza objetivo para equipamentos. Conforme pode ser verificado na figura 3-9, a mudança do ângulo da reta que mostra a distribuição das partículas por faixas de tamanho, a avaliação da inclinação da distribuição das partículas grandes e o nivelamento geral da distribuição têm influência geral na interpretação dos resultados e auxilia na tomada de ações corretivas.

3.2.4 Análise de resíduos de desgaste

Resíduos de desgaste, dependendo de seu tamanho, podem ser analisados tanto por espectrometria, como por ferrografia como por ambas as técnicas.

Dados de 1992 retirados de Lockwood; Dalley, registram que a utilização da ferrografia em conjunto com análise espectrométrica fornecem predições antecipadas e mais confiáveis, comparando-se com a utilização única da espectrometria. Entretanto, ao passo que uma análise espectrométrica custa da ordem de US\$ 10,00 por amostra, uma análise ferrográfica é mais cara, cerca de US\$ 25,00 por amostra.

3.2.4.1. Espectometria

Lockwood, Dalley (1992) registram que ao final do ano de 1940, a indústria ferroviária iniciou a realização de testes de metais de desgaste em lubrificantes. Métodos espectrométricos incluem absorção atômica, espectrometria por emissão atômica, emissão de plasma induzido acoplado e raio x fluorescente. Destes, a emissão atômica e o plasma que detectam a luz emitida pelos elementos são os mais populares devido ao menor custo, maior velocidade e outros fatores. Excetuando-se a realização de medições especiais para pesquisas, a análise espectrométrica de metais determina a concentração de metais solúveis e partículas metálicas em tamanhos superiores a 10 μm . Partículas de desgaste anormal como deslizamento severo e desgaste por *scuffing* geralmente são superiores a 10 μm . A presença de partículas de contaminação como silício, ou a combinação do silício com alumínio e titânio, são frequentemente registradas como evidências da contaminação por sujeira.

3.2.4.2. Ferrografia

Scott (1977) define ferrografia como uma técnica na qual os resíduos de desgaste e as partículas contaminantes são separadas do lubrificante e analisadas. A utilização dessa técnica no monitoramento da condição de equipamentos previne a ocorrência de falhas e permitem prolongar os geralmente caros períodos gastos na desmontagem corretiva de máquinas e componentes.

Lubrificantes, seus aditivos e seus contaminantes podem ter sua influência na condição da máquina analisadas pela ferrografia.

Reda; Bowen; Westcott (1975) conseguiram através da ferrografia, classificar faixas de seis modos de desgaste analisando a interface de superfícies de aço em movimentos de deslizamento.

Scott; Seifert; Westcott (1975) descrevem a técnica, registrando a importância do seu uso nos anos 80, permitindo o monitoramento *in situ* de mecanismos inacessíveis. Isto proporcionava alterações satisfatórias de projetos antes da utilização dos equipamentos em serviço.

Laskowski (1984) cita a introdução dessa técnica numa refinaria japonesa no ano de 1982. A ferrografia não só acrescentou estabilidade aos métodos de análise

de vibrações e espectrometria por análise de óleos usados, como também tornou-se a ferramenta mais importante para a predição de falhas de bombas e compressores.

Jones (1979) reporta também boas correlações conseguidas na prática do monitoramento de motores diesel em conjunto com valores de metais de desgaste observados por espectrometria de absorção atômica.

Yardley (1979) faz considerações sobre as limitações da técnica. Registra que durante o monitoramento experimental de caixas de engrenagens sujeitas a contaminação com partículas de desgaste, em quatro falhas ocorridas durante os experimentos, todas foram diagnosticadas por espectrometria, porém apenas três foram detectadas por ferrografia. Além de discorrer sobre vantagens e restrições, ressalta que as duas técnicas devem sempre ser consideradas como complementares.

Nunnari; Dalley (1991) definem ferrografia como um método de avaliação utilizado para analisar partículas separadas de fluidos. Desenvolvido em 1971, ele foi usado inicialmente para precipitar magneticamente partículas de desgaste ferroso suspensas nos óleos lubrificantes. Existem dois tipos básicos de ferrografia, a ferrografia de leitura direta e o sistema de ferrografia analítica. Os autores colocam que a ferrografia de leitura direta é utilizada para se obter valores numéricos médios de desgaste normal. Quando aumentos repentinos ocorrem nesse tipo de leitura, a ferrografia analítica permite analisar visualmente as partículas de desgaste por ordem de tamanho. Partículas de 5 μm e maiores são confinadas da entrada para o fim do campo de deposição, sendo que seus tamanhos vão ficando progressivamente menores ao longo dessa faixa. As concentrações de partículas são medidas através de luz na entrada e numa distância de cerca de 4 mm ao longo da lâmina. Baseados nos valores de densidade de partículas grandes D_L (> 5 microns) e densidade de partículas pequenas D_S (< 5 microns), pode-se determinar os valores das concentrações de partículas de desgaste e as porcentagens entre os tamanhos das partículas. Continuando o artigo, os autores colocam quando os valores de ferrografia direta indicam desgaste anormal, técnicas de ferrografia analítica podem ser utilizadas para se estudar a origem do desgaste. Costuma-se fazer uso de um ferrosópio, que é um microscópio bicromático dotado de câmeras e lentes de aumento de 100 a 800 vezes, que utiliza também fontes coloridas de luz transmitidas e refletidas. Através de ataques na amostra e filtros de polarização, permite-se

distinguir o tamanho, a composição, a forma e a textura de partículas de desgaste metálicas e não metálicas.

Partículas de contaminação e desgaste foram originariamente reportadas e compiladas por Anderson (1982) em seu Atlas, usualmente utilizado como meio comparativo em diagnósticos tribológicos.

Baroni (1998) incrementou essa classificação, acrescentando com ineditismo outras partículas, componentes e definições. Fotos de algumas dessas partículas são mostradas na figura 3-10.

Existe vasta literatura descrevendo o estudo de casos práticos e a detecção de modos de desgaste em diversos componentes e máquina fazendo uso dessa técnica. A maioria dos artigos pesquisados registram a boa aplicabilidade da técnica de ferrografia, especialmente em campos de aplicações de operações contínuas e automatizadas, registrando sua efetividade como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões gerenciais de forma efetiva.

<p>ESFOLIAÇÃO</p> <p>Exemplo de redutor em estado normal de desgaste.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>		<p>LAMINAR</p> <p>Rolamento em fase inicial de pitting.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>	
<p>DESGASTE SEVERO</p> <p>Partícula gerada por arrastamento de material devido contato metal-metal. Este desgaste foi provocado por falha do lubrificante que estava com viscosidade incorreta.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>		<p>ESFERAS CONTAMINANTES</p> <p>Resíduos de solda elétrica efetuada em sistema hidráulico. O flushing realizado não foi suficiente para a limpeza do sistema.</p> <p>Ampliação = 1000 X</p>	
<p>ABRASÃO</p> <p>Partícula semelhante a cavaco de usinagem, gerada pela presença de areia no sistema.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>		<p>CONTAMINANTE ORGÂNICO</p> <p>Fibras de filtro de má qualidade.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>	
<p>NACO</p> <p>Pitting em engrenagem cementada.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>		<p>METAIS NÃO FERROSOS</p> <p>Liga de Alumínio oriunda de desgaste em labirintos.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>	

Figura 3-10 Exemplos de contaminantes sólidos em lubrificantes vistos por ferrografia (Baroni, 2002)

3.3. Efeitos da contaminação no desempenho dos rolamentos

Nesta parte do trabalho iremos destacar um resumo de trabalhos encontrados na literatura que envolvem o impacto de contaminantes no desempenho dos rolamentos e mais recentemente evoluções no cálculo da vida nominal dos mesmos.

Em Ronen; Malkin (1983), que realizou experimentos envolvendo mancais hidrodinâmicos lubrificadas com óleos limpos e contaminados, registra-se que a contaminação por partículas abrasivas em mancais hidrodinâmicos leva ao aumento do atrito e do desgaste. Como consequência de perdas de energia por atrito, o mancal

registrou um aumento na temperatura de operação o qual fazia diminuir a viscosidade do óleo e também reduzir a capacidade de suportar carregamentos hidrodinâmicos. Concluiu-se que o desgaste causado por partículas abrasivas no óleo, cujo tamanho fosse superior a espessura do filme de óleo, poderia limitar a vida útil dos mancais .

Loewenthal, Moyer; Needelman (1982), num estudo sobre efeitos da ultra limpeza e filtração centrífuga nos óleos de rolamentos, registraram na época, que havia ampla evidência na literatura que contaminantes em sistemas lubrificados aumentavam significativamente o desgaste de rolamentos. Em sistemas propulsores de aviões, resíduos são o maior fator de falha de componentes. Um levantamento das causas de falhas para motores de aviões, transmissões e mancais de apoio, indicam que o grupo de edentações/contaminação representa aproximadamente 20 % de todas as falhas de mancais.

Fitzsimmons; Clevenger (1975) realizaram pesquisa registrando os principais efeitos dos contaminantes em rolamentos de rolos cônicos. Sugerem que contaminantes sólidos em lubrificantes podem conduzir ao desgaste abrasivo a três corpos, o qual ocorre quando partículas são introduzidas entre superfícies deslizantes e o material desgasta-se em cada uma das superfícies. Os pesquisadores procuraram dar uma conotação mais física ao efeito da contaminação na performance de rolamentos de rolos cônicos, abordando por exemplo, os modos de danos causados pela presença de contaminantes. Descrevem que a contaminação pode vir a ocasionar excessivo desgaste em rolamentos de rolos cônicos , resultando na redução total da largura do rolamento, o qual pode vir a resultar em aumentos na deflexão do eixo ou mudança na posição de operação relativa dos engrenamentos. Isto provavelmente seria ocasionado pelo mecanismo de lubrificação do rolo, que faz com que o lubrificante seja bombeado na direção da montagem da capa-cone para o fim do rolo, conforme figura 3-11.

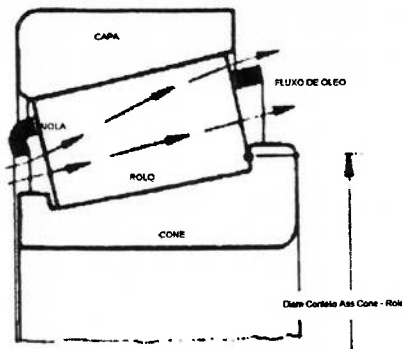


Figura 3-11 Fluxo de lubrificante num rolamento de rolos
(Fitzsimmons, Clevenger, 1975) * adaptado e traduzido pelo autor

Eles sugerem que, estando o lubrificante contaminado, a ação de circulação contínua do lubrificante pelos rolos provocaria em uma lapidação abrasiva da superfície do rolo. Para isto efetivamente ocorrer, partículas que são significativamente maiores que a espessura do filme lubrificante precisariam enfrentar consideráveis reduções para só assim circularem efetivamente através dos filmes lubrificantes normalmente encontrados nesse tipo de rolamento. Ou seja, o desgaste abrasivo pode ser tolerado até que o mesmo cause modificações nas dimensões dos rolamentos que os tornem críticos para as aplicações.

Nesse estudo foi utilizada uma máquina que lembrava uma caixa de câmbio automotiva, com os rolamentos lubrificadas com nível de óleo constante e contaminados com areia de sílica. Os mesmos eram submetidos a aplicação de rotação e carga radial constante. Os pesquisadores investigaram vários parâmetros experimentais, a saber:

- Efeitos do nível de concentração do contaminante no desgaste dos rolamentos;
- Efeitos do tamanho das partículas no desgaste dos rolamentos;
- Efeitos da dureza do contaminante na perda de massa do rolamento;
- Efeitos do tempo de teste na perda de massa do rolamento;
- Efeitos do tipo de óleo e da viscosidade na perda de massa do rolamento;

Dos resultados obtidos dos dados experimentais, as seguintes conclusões foram descritas:

- o desgaste em rolamentos de rolos cônicos é proporcional a quantidade de lubrificante, dependendo do lubrificante e do tamanho e da dureza do contaminante;
- rolamentos de rolos cônicos continuarão a apresentar desgaste tão maior for o tamanho da partícula de contaminante em relação a espessura do filme de óleo entre as superfícies;
- para rolamentos com desgaste significativo, a dureza do contaminante tende a ser maior ou no mínimo equivalente a dureza do material do rolamento.

Também registra que em amostra de lubrificante coletada com particulados contendo acima de 10-25 mg/100 ml é um forte indicativo de contaminação excessiva e/ou geração de resíduos de desgaste. Isto equivaleria na norma NAS 1638 (Hydac, 2002) a teores acima da classe 14, ou seja, condições extremamente contaminadas.

Uma outra referência consultada, a Gft Work sheet 3 (1994), aborda em seu capítulo sobre contaminação de lubrificantes alguns pontos da experiência de Fitzsimmons. Partículas sólidas estranhas levam ao desgaste e fadiga prematura. Partículas duras em rolamentos causam desgaste abrasivo, particularmente nas áreas de contato com elevada taxa de atrito de deslizamento, como por exemplo nas superfícies de contato das faces dos rolos. O desgaste aumenta com a dureza da partícula e é mais ou menos proporcional com a concentração das partículas no lubrificante e com o tamanho da partícula. Desgaste igualmente ocorre com partículas extremamente pequenas. Desgaste abrasivo em rolamentos é aceitável até uma certa extensão, sendo que a quantidade permitida de desgaste irá variar de acordo com a aplicação. A circulação de partículas grandes causam endentações nas pistas. O material deformado plasticamente é laminado em suas extremidades e somente uma parte é removida durante a laminação seguinte. Cada carga seguinte causa um ciclo de tensões cada vez maiores na área da endentação, a qual resulta na redução de vida à fadiga. Quanto maior a dureza das partículas circuladas e menor o tamanho do rolamento, menor sua vida.

Ioannides, Beghini, Jacobson (1993) registram em seu artigo de que forma a contaminação no lubrificante afeta a expectativa de vida dos rolamentos. A predição dos efeitos dos contaminantes nos contatos dependem muito das propriedades dos

contaminantes e seus resultados nas endentações nos rolamentos. Os autores do artigo têm estudado dois tipos de partículas contaminantes: partículas metálicas ou dúteis e cerâmicas ou frágeis.

Analisando-se a figura 3-12, percebe-se que dependendo da dureza das pistas, da espessura do filme lubrificante e do coeficiente interfacial de atrito μ , regiões de danos e regiões seguras (acomodação elástica de partículas), além de combinações de dureza e tamanho de partículas esféricas, podem existir regiões de funcionamento de rolamentos seguras e sujeitas a danos.

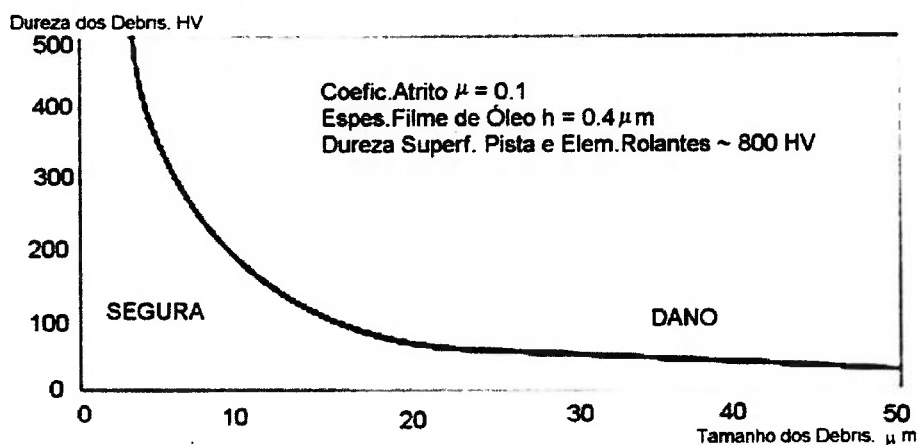


Figura 3-12. Mapeamento de regiões de dano e segura através de combinações entre dureza e tamanho de resíduos (Ioannides, Beghini, Jacobson, 1993)

* adaptado e traduzido pelo autor

O artigo reporta ainda que evidências sugerem que partículas com elevada tenacidade à fratura sejam capazes de ocasionar significativas endentações e reduzir a vida de rolamentos através da retirada de lascas, enquanto que partículas frágeis com baixa tenacidade à fratura fragmentariam-se rapidamente e esse tornariam mais perigosas em termos de desgaste.

Com base nas relações entre o material da partícula, o tamanho, a forma, a dureza ou tenacidade a fratura, um fator de contaminação denominado η_c foi caracterizado. O mesmo deverá ser levado em conta nos cálculos atuais de vida nominal de rolamentos, podendo contribuir para a redução de suas vidas em até cinquenta vezes.

Jacobson (2000) reporta em seu artigo os efeitos dos contaminantes durante o amaciamento de rolamentos e engrenagens. Coloca que quando o lubrificante é

limpo, as superfícies atravessarão a fase de amaciamento de forma adequada. No entanto, se o lubrificante contiver partículas, e as mesmas forem suficientemente grandes e duras, o processo de amaciamento das superfícies poderá ser destruído e as mesmas jamais se tornarão polidas o suficiente para serem separadas através de um filme de óleo lubrificante. As superfícies irão apresentar desgaste ou descascamento conforme forem as propriedades e a concentração do contaminante.

Chao et al (1996) *apud* Berg(2001) têm conduzido estudos dos efeitos da contaminação de partículas sobre a superfície de contato de rolamentos. Ele descobriu que a vida L_{10} (vida de rolamentos com 90 % de confiabilidade) diminui severamente com o aumento da partícula, na região onde a dureza da partícula sólida é menor do que aquela sobre a superfície de rolamento. Partículas mais duras que e tão duras quanto a superfície do rolamento diminuem ao máximo a vida L_{10} , mas o aumento com a dureza da partícula não é tão severo como no primeiro caso.

4 PARTÍCULAS NO CONTATO DE LUBRIFICAÇÃO ELASTO HIDRODINAMICO

4.1.Introdução

A questão do comportamento de partículas contaminantes no contato entre as pistas e as esferas dos rolamentos têm grande importância no desenvolvimento e na compreensão dos fenômenos da parte prática deste trabalho. Este capítulo será dedicado a abordar exclusivamente esse tema.

Assim sendo, inicialmente será elaborado um breve resumo sobre a lubrificação de rolamentos. Em seguida será descrito o modo de lubrificação E-H e finalmente será apresentado um resumo sobre um estudo que envolveu o comportamento de partículas contaminantes em contatos E-H, com base em uma tese de doutorado de 1993, por um pesquisador do Imperial College of Science, de Londres, Inglaterra.

4.2 A lubrificação de rolamentos

Em SKF (1985) consta que as principais funções de um lubrificante para rolamentos são:

- Formar uma película suficientemente espessa entre os componentes do rolamento que se movem uns contra os outros a fim de se evitar o contato metálico;
- Reduzir o atrito e eliminar desgastes;
- Proteger contra a corrosão;
- Proteger, no caso de uso de graxa, contra a entrada de impurezas tais como sujeira, pó, umidade e água.

Estabelece que a lubrificação de rolamentos normalmente são realizadas com graxas e óleos, e somente em alguns casos especiais com lubrificantes sólidos.

Em outra publicação, SKF (1980) cita que a adequada lubrificação de rolamentos é essencial para o sucesso de seu desempenho. O Comitê Anual de Engenheiros de Rolamentos (ABEC), dos Estados Unidos, estabeleceu após extensiva pesquisa, as seguintes recomendações:

- O torque de atrito de um rolamento de esferas lubrificado com óleo consiste essencialmente de dois componentes, um deles é função do projeto do mancal e da carga imposta sobre o rolamento, e o outro é uma função da viscosidade e da quantidade de óleo e da rotação do rolamento;
- Quanto menor for a quantidade de óleo, somente suficiente para formar um fino filme sobre as superfícies em contato, menor será o torque de atrito;
- A energia perdida em um rolamento é proporcional ao produto do torque pela velocidade;
- Como a lubrificação de rolamentos a óleo é influenciada por muitos fatores ligados ao torque de atrito, perda de energia e aumento de temperatura, é evidentemente impossível estabelecer recomendações definitivas sobre a seleção de um óleo lubrificante para todas as aplicações de rolamentos;
- Na grande maioria das aplicações óleos minerais puros são muito satisfatórios para a lubrificação de rolamentos, mas eles devem, logicamente, estar livres de contaminações que possam causar desgaste no mancal, e eles devem mostrar elevada resistência á oxidação, formação de gomas e lacas, e á deterioração pela evaporação de suas frações leves, além do que não devem causar corrosão em qualquer parte do rolamento tanto durante o armazenamento como durante a operação;
- Para baixas temperaturas de partida, óleos lubrificante para rolamentos devem apresentar baixo ponto de fluidez para evitar travamento do rolamento;
- Em aplicações especiais, óleos compostos podem ser preferidos, e nesses casos a recomendação do fabricante do lubrificante deve ser solicitada.

Clarke (1972) registra que em condições de trabalho normal, óleos minerais aditivados e refinados por solventes são os mais adequados para lubrificar rolamentos. A utilização de lubrificantes sintéticos deve ficar reservada para aplicações especiais. De um modo geral deve-se seguir as seguintes recomendações:

- empregar óleos lubrificantes de baixa viscosidade para rolamentos com baixa temperatura de trabalho , elevada rotação ou pequena carga;

- utilizar óleos com elevada viscosidade para rolamentos com elevada temperatura de trabalho , baixas rotações ou elevada carga;
- utilizar óleos com elevado índice de viscosidade para rolamentos nos quais a temperatura de trabalho varia muito;
- utilizar óleos lubrificantes resistentes á oxidação para rolamentos com elevados períodos de funcionamento contínuo.

Cita também em seu artigo que as principais propriedades e métodos de ensaio que devem ser avaliadas para óleos de rolamentos são:

- Viscosidade e índice de viscosidade (variação da viscosidade com a temperatura);
- Densidade;
- Ponto de inflamação;
- Índice de acidez;
- Resistência a oxidação;
- Resistência a elevadas pressões;
- Poder anticorrosivo;
- Propriedades anti desgaste.

4.3 Regimes de lubrificação

Hamrock (1984) coloca que se um elemento de máquina é adequadamente projetado e lubrificado, as superfícies lubrificadas são separadas por um filme lubrificante. Tallian et al. (1965) *apud* Hamroch (1984), reportam testes de resistência á vida em rolamentos de esferas, os quais demonstraram que , quando o filme lubrificante é suficientemente espesso para separar os corpos em contato, a vida a fadiga do rolamento é altamente extendida. Ao contrário, quando o filme não é espesso o suficiente para oferecer separação total entre as asperezas na zona de contato, a vida do rolamento é adversamente afetada por um alto cisalhamento resultante do contato direto de metal contra metal.

O pesquisador define quatro regimes distintos de lubrificação:

- Lubrificação hidrodinâmica, geralmente caracterizado por superfícies conformes, com espessura normalmente superior a 1 μm ;

- Lubrificação Elasto-Hidrodinâmica, onde as deformações elásticas das superfícies lubrificadas tornam-se significantes. Em regime E-H duro, encontrado por exemplo em rolamentos e engrenagens, a espessura mínima do filme geralmente excede $0,1 \mu\text{m}$. Em regime E-H mole, encontrado em materiais como borrachas e elastômeros, a espessura mínima do filme é tipicamente de $1,0 \mu\text{m}$;
- Lubrificação Limite, regime no qual os sólidos não são separados pelo lubrificante, os efeitos do filme fluido são desprezíveis e existe um considerável contato entre as asperezas. Os filmes superficiais variam em sua espessura entre 1 até 10 nm, dependendo do tamanho molecular do lubrificante;
- Lubrificação Parcial ou Mista, regime no qual coexistirão algum contato entre asperezas e alguma lubrificação parcial. O comportamento da junção será governado por uma combinação entre efeitos de filmes fluidos e limites. A espessura média do filme nessa junção será menor que 1 e maior do que $0,01 \mu\text{m}$.

Já Dwyer-Joyce (1993) coloca que quando superfícies estão em contato as asperezas se tocam e devido a carga ser suportada sobre uma pequena área, altas pressões e fluxo plástico resultam. As asperezas podem localmente soldarem-se e formarem junções. Se movimento relativo ocorrer, essas junções serão quebradas e refeitas, e altos coeficientes de atrito e danos superficiais ocorrerão. Componentes de engenharia que operam sob essas condições não poderão durar muito. O propósito da lubrificação é o de separar essas superfícies pela interposição de uma camada de um material de baixa tensão superficial. Em geral, quanto mais espesso esse filme lubrificante melhor, desde que superfícies sejam separadas e o atrito seja mantido baixo. O autor descreve então cinco tipos de regimes de lubrificação:

- Atrito seco: filmes óxidos e camadas adsorvidas cobrem a superfície no contato. Esses filmes oferecem alguma leve proteção, mas geralmente oxidam a moderadas cargas e velocidades;
- Lubrificação Hidrodinâmica: as duas superfícies em contato têm seus picos e vales separados; o movimento relativo entre elas causa o arrastamento do lubrificante entre as partes;

- **Lubrificação Hidrostática:** nesse processo as superfícies em contato são separadas pelo filme lubrificante o qual é despejado vindo de uma fonte externa em alta pressão;
- **Lubrificação Limite:** os componentes em contato são parcialmente separados por uma camada química de baixa tensão de cisalhamento, a qual é normalmente adsorvida ou adere sobre as superfícies. A camada lubrificante é fina e consideráveis contatos sólidos ocorrem. Compostos quimicamente ativos (geralmente compostos à base de enxofre e fósforo) são adicionados ao lubrificante para reagir com as superfícies e produzir esses filmes;
- **Lubrificação Elasto-Hidrodinâmica:** quando as duas superfícies de contato se opõem sobre uma pequena área, as pressões de contato são altas e resultam em distorções dos corpos e num aumento da viscosidade do lubrificante.

A tabela 4-1 resume esses regimes e fornece alguns típicos coeficientes de atrito e aplicações:

Tabela 4-1: Sumário dos cinco principais regimes de lubrificação com espessuras típicas de filme e coeficientes de atrito (Dwyer – Joyce, 1993)

*adaptado e traduzido pelo autor

Regime de Lubrificação	Espessura Típica do Filme (μm)	Formação do Filme	Coefficiente de atrito μ	Exemplos
Atrito seco	0,001 a 0,01	Nenhum	> 0,5	-
Hidrodinâmico	1 – 100	Arrastamento de óleo	0,007 – 0,03	Mancais de deslizamento
Hidrostático	1 – 100	Bombeamento de óleo	0,007 – 0,03	Fusos de máquinas ferramenta
Limite	0,001 – 0,05	Reação entre aditivos	0,08 – 0,3	Corte de metais
Elasto – hidrodinâmico	0,1 – 1,0	Arrastamento de óleo e aumento da viscosidade	0,001 – 0,1	Engrenagens, rolamentos de esferas

O pesquisador coloca também que muitos sistemas práticos de lubrificação operam sob uma mistura de regimes. Assim sendo, um parâmetro útil no estudo das superfícies de contato e lubrificação é a espessura específica do filme, ou relação lambda, λ . Ele é a relação da espessura mínima do filme (h_0) pelo valor da

rugosidade composta (RMS), σ_c das duas superfícies, e é a medida da quantidade de superfície em contato.

$$\lambda = h_0 / \sigma_c$$

onde

$$\sigma_c = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0,5}$$

onde

σ_c é o RMS composto das duas superfícies em contato,

σ_1 e σ_2 são os valores das rugosidades de cada uma das superfícies em contato

Estas fórmulas foram utilizadas no item 6.7.2, mais precisamente na tabela 6-3 da parte experimental para se definir o filme lubrificante teórico entre os contatos pistas-esferas do rolamento.

4.4. Lubrificação Elasto hidrodinâmica

Dwyer-Joyce (1993) informa que o significado detalhado do termo: lubrificação elasto-hidrodinâmica encontra-se em seu próprio nome: elasto = distorção, hydro = fluida, dinâmica = movimento.

Dowson (1995) relata em seu artigo um histórico sobre o entendimento da lubrificação por filme fluido através de experimentos clássicos e estudos teóricos desde o ano de 1880. Discute todos os parâmetros que influenciam nos cálculos dos filmes hidrodinâmicos e elasto-hidrodinâmicos, citando inclusive experimentos práticos de medição da espessura por interferometria ótica.

Dowson (1995) *apud* Hamrock (1965) define lubrificação elasto hidrodinâmica como “o estudo das situações nas quais deformações elásticas de sólidos ao redor dos contatos desempenham uma importante regra no processo de lubrificação hidrodinâmica”. Lubrificação elasto-hidrodinâmica implica uma completa lubrificação por filme fluido e nenhuma interação entre as asperezas das superfícies. Existem duas distintas formas de lubrificação elasto- hidrodinâmica:

- Lubrificação elasto-hidrodinâmica dura: relativa a materiais de elevado módulo de elasticidade, como os metais. Nesta forma de lubrificação não apenas os efeitos das deformações elásticas são importantes, como também os efeitos da pressão-viscosidade. Aplicações de engenharia na qual essa forma de lubrificação é dominante incluem engrenagens e rolamentos;
- Lubrificação elasto-hidrodinâmica mole: relativa a materiais de baixo módulo de elasticidade como as borrachas. Para esses materiais as distorções elásticas são grandes, até com baixas cargas. Um detalhe importante é o desprezível efeito da pressão-viscosidade sobre o filme lubrificante. Aplicações de engenharia na qual esse tipo de regime é encontrado incluem vedações, juntas humanas, pneus e um grande número de elementos de máquina à base de materiais elastoméricos.

Hutchings (1992) registra que contatos não conformes como aqueles registrados entre pista e esfera em um rolamento de esferas se caracterizam por envolver contatos concentrados em áreas muito pequenas. Nessas condições, é grande a dependência da viscosidade do lubrificante com a pressão assim como com as deformações elásticas das superfícies do mancal. A lubrificação nessas circunstâncias é chamada de lubrificação elasto-hidrodinâmica, ou E-H.

Sakurai (1981) faz menção em seu artigo as regras de reações químicas que regem a lubrificação de contatos concentrados em regime de lubrificação E-H. Segundo eles existem duas abordagens a serem avaliadas, uma se refere a análise de filmes produzidos sobre as superfícies metálicas após as reações químicas, e a outra diz respeito a análise da cinética química durante o contato concentrado lubrificado.

Como abordagens envolvendo reações químicas do lubrificante e suas prováveis degradações químicas em condição de E-HL não se encaixam nos objetivos traçados para este projeto, não será contemplado no trabalho esse tipo de influência nem tampouco o efeito da degradação do lubrificante em regime de lubrificação E-H. Estaremos ao invés disso, estabelecendo entre os parâmetros fixos da parte experimental, lubrificantes de viscosidade minerais de adequada estabilidade química e isentos de carga de aditivação, justamente para desprezarmos a ação dessas possíveis influências.

A investigação dos efeitos abrasivos na lubrificação sempre teve grande interesse científico pela natural correlação desses fenômenos com os mancais de deslizamento, amplamente utilizados em motores automotivos. Já a literatura relacionada com mancais de rolamentos está necessariamente atrelada aos efeitos no desempenho e na diminuição da vida útil dos mesmos, itens que serão abordados nos próximos a diante.

4.5. Espessura de filmes em lubrificação E-H

Diversas bibliografias que foram consultadas fazem menção ao cálculo da espessura de filmes E-H. Escolheu-se o modelo teórico de Hamrock (1984) pelo fato do mesmo ser aplicado para rolamentos. mesmo quando aborda o assunto faz considerações sobre tensões de contato e deformações, definindo o fator k , chamado de parâmetro de elipticidade, conforme pode ser verificado na figura 4-1.

$$k = D_y / D_x$$

Sendo

D_y = Diâmetro do contato elíptico na direção y , transversal

D_x = Diâmetro do contato elíptico na direção x , do movimento

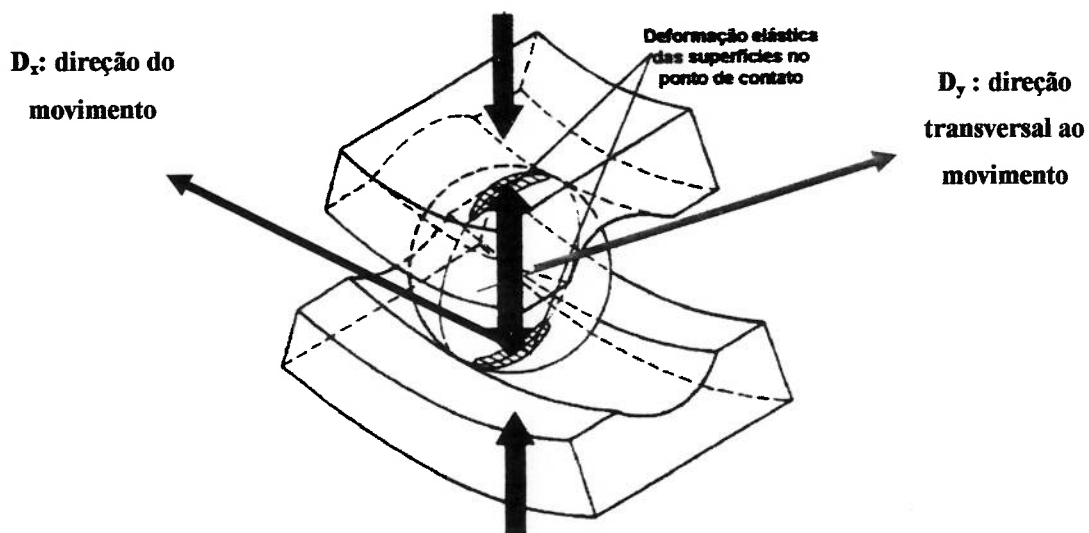


Figura 4-1. Parâmetro de elipticidade em contato de lubrificação E-H
(Stulgys, 1998)

Após definir o contato esfera-pista de um rolamento como elíptico, faz as seguintes caracterizações de cinco grupos de dimensões:

- Espessura de filme adimensional, chamado de H;
- Parâmetro de elipticidade, chamado de k ;
- Parâmetro adimensional de carga, chamado de W;
- Parâmetro adimensional de velocidade, chamado de U;
- Parâmetro adimensional de materiais, chamado de G;

A espessura de filme mínimo adimensional poderia então ser escrita como função dos outros parâmetros envolvidos:

$$H = f(k, U, W, G)$$

Este tipo de cálculo foi utilizado no item 6.7.2 para calcular os filmes teóricos de cada condição experimental definida por carga radial e velocidade do rolamento. A seqüência utilizada será melhor descrita nesse item.

A fórmula do filme de lubrificação E-H duro utilizada foi:

$$H_{\min} = 3,63 \cdot U^{0,68} \cdot G^{0,49} \cdot W^{-0,73} \cdot (1 - e^{-0,68k})$$

4.6. Partículas no contato de lubrificação E-H

Nesta parte do trabalho iremos abordar o assunto da entrada de contaminantes num contato elasto-hidrodinâmico. Entendemos que a abordagem desse tópico se justifica devido ao fato desse fenômeno ter ocorrido na parte experimental do trabalho.

Nikas, Sayles, Yoannides (1998) realizaram estudo envolvendo os impactos teóricos de contaminantes em contatos de lubrificação E-H. Através de simulações matemáticas envolvendo a dureza das partículas no contato e os aumentos de temperatura observados nas asperezas, mostraram os efeitos nocivos da presença dos contaminantes na entrada dos contatos. Também mostrou-se teoricamente que altas temperaturas de pico das asperezas são encontradas nas superfícies de atrito entre as partículas e as faces comprimidas. Os fenômenos de *scuffing* podem então ocorrer em escala local ou em massa, dependendo da dureza das partículas envolvidas.

A literatura de referência desta parte do texto será a tese de doutorado de Dwyer –Joyce (1993), que dedicou bastante ênfase a esse tópico.

4.6.1. Efeitos dos resíduos em contatos de lubrificação E-H

No capítulo intitulado “Resíduos em contato de lubrificação elasto-hidrodinâmico”, o pesquisador inicialmente elabora uma revisão bibliográfica sobre trabalhos de outros colegas que abordaram os efeitos dos resíduos de lubrificante, que têm sido baseados na medição e predição das endentações em contatos gerados pelos filmes lubrificantes. Destacamos duas das referências citadas.

Sliney (1978) *apud* Dwyer-Joyce (1993) utilizou a interferência ótica para investigar o comportamento de partículas na região de deslizamento de contatos concentrados. Ele notou que materiais com um alto grau de plasticidade, a habilidade para coalescer e a habilidade para aderir as superfícies era boa para a formação de filmes sólidos lubrificantes. O bissulfeto de molibidênio formou um filme no contato sob condições secas, mas quando o lubrificante foi introduzido, a aderência diminuiu e as partículas permaneceram estacionadas na região de entrada do contato. Já partículas de carbeto de silício foram encontradas fraturadas e esfoliadas nas superfícies assim que atravessaram o contato.

Outra experiência relevante é citada no texto. Wan and Spikes (1987) *apud* Dwyer-Joyce (1993) realizaram alguns trabalhos envolvendo o comportamento de partículas sólidas em contatos de lubrificação E-H. Um aparelho óptico de lubrificação E-H foi usado em conjunto com lubrificantes contaminados. Altas velocidades de filmagem fotográfica foram usadas para registrar o comportamento de vários resíduos de materiais num contato de rolamento. Foi constatado que quantidades de todos os tamanhos de partículas testados (faixa de tamanho de 10 a 53 μm) entraram no contato. Geralmente **materiais dúteis se laminaram** com pequeno efeito sobre o filme de óleo. Foi notado também que sob condições de elevado deslizamento, resíduos de partículas bloquearam a região de entrada do contato, causando degradação e abrasão superficial.

4.6.2. Experiências com aparelho ótico de lubrificação E-H

Em seguida, Dwyer-Joyce (1993) descreve alguns dos resultados encontrados durante seus ensaios usando o aparelho ótico de lubrificação E-H. O aparelho registra o comportamento de uma esfera de aço sobre um disco de vidro. A primeira constatação registra que quando aumenta-se a velocidade de rolamento, a espessura do filme lubrificante central aumenta proporcionalmente.

Outra experiência registra o comportamento de resíduos na região de entrada do contato. Vários pós foram misturados a um óleo tipo turbina ISO 68 na concentração de 1 g/l. Foram utilizados materiais dúteis originariamente com 30 μm e partículas cerâmicas frágeis da ordem de 60 μm . A mistura foi derramada sobre o disco de vidro e penetrou no contato. Um aparelho dotado de vídeo de alta velocidade e curta duração de flash fotográfico foi utilizado para registrar o comportamento das partículas na entrada.

Os resultados mostraram que **materiais dúteis, como cobre, ferro fundido e aço de baixo carbono foram laminados na região de entrada**. Originariamente, esferas de cobre de 30 μm foram as que foram laminadas e que entraram no contato. Os discos laminados de cobre tenderam a aderir às superfícies das esferas e a reentrar no contato após uma volta da esfera. Partículas de ferro e aço foram varridas da região de contato. Exame dos resíduos relaminados mostraram que **as partículas foram roladas e alongadas em forma de discos planos** com suas extremidades levemente separadas.

Já partículas **cerâmicas frágeis, como discos de esferas na forma de balões, foram fraturados logo na região de entrada, tão rápido quanto foram submetidas à carga**. Estas partículas mediam entre 5 e 60 μm . Partículas que não foram afetadas apresentaram brilho diferenciado. Os fragmentos foram então varridas para os lados dos contatos. Aqui também foram registrados imagens com o equipamento de alta velocidade fotográfica.

Partículas cerâmicas rígidas, como carvão de silício ou alumina, fraturaram-se muito mais na região de entrada do contato. O número de fragmentos tendeu a aumentar e passar através do contato na massa, causando alguma fratura no disco de vidro. Muito menos dispersão de fragmentos ocorreu e alguns foram varridos para os lados.

Como conclusão desses experimentos realizados com filmes lubrificantes de espessura menor do que $1\ \mu\text{m}$, Dwyer-Joyce faz considerações sobre acomodações geométricas que tomam lugar quando estas partículas são **trituradas**. Os experimentos mostraram que **três mecanismos de deformação** ocorrem dependendo das propriedades dos materiais e do tamanho dos resíduos das partículas:

- Partículas dúteis plasticamente deformadas por laminação: superfícies de contato elástica ou plasticamente deformadas dependendo das durezas relativas;
- Materiais cerâmicos fraturáveis: superfícies de contato elástica ou plasticamente deformadas dependendo da tenacidade dos materiais dos resíduos. Os fragmentos entram no contato e as superfícies se deformam plasticamente ao redor deles;
- Partículas cerâmicas de pequenos tamanhos: permanecem sem danos e com as superfícies em contato plasticamente deformadas ao redor delas.

A figura 4-2 mostra o provável processo que partículas de quartzo (que foram utilizadas na parte experimental) teriam sofrido ao serem submetidas ao experimento

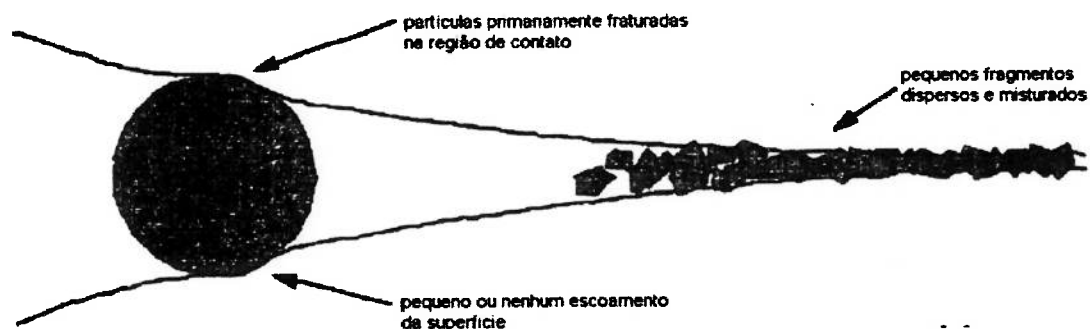


Figura 4-2 Diagrama esquemático do processo pelo qual materiais cerâmicos frágeis entram em um contato de lubrificação E-H (Dwyer-Joyce, 1993)

* adaptado e traduzido pelo autor

Dwyer-Joyce (1993) relata que tanto os experimentos com a lubrificação E-H como os modelos simples que foram apresentados são idealizações. No contato concentrado real outros fatores irão afetar a entrada das partículas.

Forças no fluido na região de entrada aparecem para varrer pequenas partículas. Pequenas partículas podem ser menos sujeitas a entrar no contato do que partículas grandes as quais tornam-se capturadas entre as superfícies fechadas e as forças formadas pelo fluido. Num rolamento rígido de esferas, onde a relação largura pelo comprimento é da ordem de 10, é fácil visualizar que a maior parte das partículas tornam-se entrantes. A forma da partícula também é importante; uma partícula pontuda será encaixada mais facilmente e será levada para dentro do contato.

Finalizando, Dwyer-Joyce (1993) faz ponderações sobre a influência da concentração do contaminante numa situação de ruptura de filme lubrificante. Realizou experiências através do interferômetro óptico, com partículas frágeis de carbetto de silício de 6 μm em diversas concentrações. Os resultados sugeriram que a espessura do filme não parecia depender da presença de partículas no lubrificante.

4.6.3. Conclusões

Do capítulo que foi discutido podem-se apontar as seguintes constatações:

- **Materiais frágeis foram fraturados na região de entrada** e os fragmentos, cujos tamanhos dependiam da tenacidade do material, apresentavam-se envolvidos no contato. Houve **tritramento de partículas**, originariamente de tamanho de 60 μm . Os tamanhos dos fragmentos moídos testados foram:
 - Partículas de areia do Arizona: < 1 μm ;
 - Fragmentos de alumina: < 3 μm ;
 - Partículas de carbetto de silício: 6 μm
- Os resíduos das partículas influenciam fracamente a espessura do filme. As cargas suportadas pelas partículas foram pequenas comparadas com as cargas de contato.
- O número de partículas as quais entraram num contato óptico de lubrificação elasto-hidrodinâmica foram aproximadamente da mesma proporção da concentração dos resíduos no óleo.

5 LUBRIFICAÇÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Neste capítulo será apresentado uma revisão das referências bibliográficas envolvendo a descrição de técnicas utilizadas para a detecção de anormalidades relacionadas a lubrificação e a contaminação em rolamentos através do uso de técnicas preditivas, com ênfase no uso de análise de vibrações.

5.1. Técnicas de detecção e monitoramento das condições dos componentes

Ball (1997) discute que a adoção de estratégias integradas podem ser usadas para controlar o desgaste das máquinas, fazendo uso apenas de testes que são de fato relevantes. Segundo ele, a adoção de dados confiáveis e tendenciáveis são vitais para esse conceito de gerenciamento. Com relação às técnicas de medição, o autor coloca que a efetividade de cada técnica depende da indicação da anormalidade. O mesmo tempo que a análise de vibrações oferece indicações rápidas de problemas rotacionais, desgaste abrasivo em lubrificantes contaminados seria primariamente detectado por análise de óleo. Somente após uma quantidade significativa de desgaste ter ocorrido, o problema seria indicado pela técnica de análise de vibrações.

Concluindo, coloca que:

- Efetivos programas de controle de desgaste devem integrar o uso do lubrificante com técnicas de vibração, termografia e análise de desempenho simultaneamente, sempre aplicadas á mesma máquina, simultaneamente para obtenção do máximo benefício;
- A aquisição de dados confiáveis e que tenham suas tendências acompanhadas são vitais esse conceito de gerenciamento;
- A utilização integrada desses tipos de programas podem produzir aumento e lucros gerais em plantas em índices que variam de 20 a 60%.

Dentro do contexto da utilização adequada de técnicas de monitoramento, Pardue, Piety; Moore (1992) fazem uma breve descrição das principais estratégias de manutenção para a obtenção da chamada Manutenção de Máquinas Centrada na Confiabilidade (RCM).

Além de definirem quatro tipos de manutenção, reativa, preventiva, preditiva e proativa, esta última direcionada para a eliminação das causas raízes das falhas,

apresentam uma relação das aplicações das técnicas de manutenção preditiva mais populares, com destaque para:

- Análise periódica do espectro de vibrações: todos equipamentos rotativos
- Análise simultânea do espectro de vibrações (on-line”): todos equipamentos rotativos;
- Análise de óleo e dos resíduos de desgaste: equipamentos críticos e de baixa velocidade;
- Termografia: Componentes elétricos, telhados, isolamento térmica

Os autores concluem o texto sugerindo passos para a implantação e aferição dos resultados do RCM em plantas industriais.

Serridge (1989) também faz considerações sobre tipo de falha e parâmetro a ser utilizado para aferição do nível global de condição de uma máquina, mostrados na tabela 5-1. Destaca a efetividade da técnica de análise de vibração na detecção da maioria dos modos de falha de máquinas.

Tabela 5-1. Aplicação de controles e técnicas no acompanhamento de tipos de falhas e componentes

* adaptado e traduzido pelo autor

Parâmetro	Temperatura	Pressão	Fluxo	Análise de Óleo	Vibração
Desbalanceamento					X
Desalinhamento	X				X
Rolamentos danificados	X			X	X
Mancais de deslizamento danificados	X	X	X	X	X
Engrenagens sem fim danificadas				X	X
Perdas mecânicas					X

Especificamente sobre o monitoramento dos rolamentos, registro que Wallin (1966) já descrevia naquela época a necessidade da realização de inspeções sensitivas para rolamentos em operação, entre as quais tocar as estruturas dos mancais e ouvi-las através do auxílio de um pedaço de madeira. Entre as técnicas “preditivas” usadas pelos operadores, estavam a medição da temperatura dos mancais com termômetros, as inspeções de nível de ruído e a observação da coloração das graxas após as re-lubrificações.

Nepomuceno (1989) coloca que os defeitos ou irregularidades que aparecem em rolamentos podem ter algumas causas, como por exemplo:

- Sobrecarga;
- Desbalanceamento;
- Variações bruscas da temperatura;
- Lubrificação inadequada;
- Partículas abrasivas ou corrosivas no lubrificante;
- Rolamento inadequadamente selecionado;
- Fadiga do material.

Tandon; Choudhury (2000) realizam em seu artigo uma vasta revisão sobre pesquisas relativas à detecção e diagnóstico de defeitos em rolamentos. Citam que as principais técnicas de diagnóstico são a análise de vibrações nos domínios do tempo e da frequência, método dos pulsos de choque, técnicas de pressão e intensidade de som, além do método de emissão acústica. Dividem as causas de defeitos em rolamentos em duas categorias, distribuídos e localizados. Os primeiros seriam causados por erros de fabricação, instalação inadequada e desgaste abrasivo. Já os defeitos localizados incluiriam trincas, marcas e descascamentos nas superfícies de rolamento.

5.2. Avaliação da lubrificação através de vibrações

A avaliação de situações de anormalidade em lubrificação através da técnica de análise de vibrações ainda é um assunto que apresenta divergências. O que ocorre de fato é que a maior parte da bibliografia consultada cita os efeitos catastróficos desencadeados pela contaminação de lubrificantes em rolamentos, entretanto, poucas são as referências que reportam o uso da acelerometria como método capaz de

diagnosticar com efetividade a presença de contaminantes em lubrificantes de rolamentos antes dos mesmos provocarem endentações nos componentes. Esta biografia referente ao diagnóstico da anormalidade em lubrificação devido a presença de contaminante ainda é muito restrita.

Tome-se como exemplo, Nunes (1989) que realizou ensaio prático simulando defeito advindo da inserção de grão de areia diretamente na pista de rolamentos lubrificados a graxa. Após dez horas de operação ininterrupta, espectros de frequências correspondentes aos desgastes ocasionados foram identificados no rolamento.

Outro exemplo dessa metodologia encontra-se em Barkov e Barkova (1995), que reporta a detecção dos efeitos nocivos da contaminação sólida em lubrificantes de rolamentos, porém já numa etapa onde os rolamentos apresentam os primeiros sinais de descascamento de suas superfícies.

Roth et all (2000) reportam em seu artigo experiências práticas envolvendo a substituição de graxas sintéticas por minerais em rolamentos de uma fábrica de cimento na Alemanha. Através do monitoramento adotado, além de se conseguir uma diminuição geral nos picos de aceleração fazendo-se uso de lubrificantes sintéticos comparativamente aos minerais, é proposto o conceito de lubrificação baseada nas condições dos rolamentos, ou seja, os períodos de re-lubrificação puderam ser estendidos com confiabilidade assegurada pelo monitoramento de vibrações. Também relata as economias conseguidas, tanto pela diminuição do consumo de lubrificantes minerais como pela diminuição de pessoal envolvido na lubrificação, através da utilização racional do monitoramento e da lubrificação da planta.

Campbell; Iacoppini (1994) relatam um caso de um conjunto de rolamentos lubrificados a graxa, cujo diagnóstico de lubrificação inadequada manifestada tanto pelo tipo incorreto de graxa como pela frequência de re-lubrificação inadequada, foram conseguidos através da análise do monitoramento dos picos de aceleração ao longo do tempo.

Outras referências também registram o monitoramento da lubrificação através de sinais de vibrações.

Wowk (1991) relata exemplo de espectro de aceleração de rolamento de um ventilador de exaustão, extremamente lubrificado com graxa, operando numa rotação

de 750 rpm. Verifica-se significativo desbalanceamento nessa frequência, provavelmente gerado por resíduos de graxa velha que aderem nas pistas do rolamento. Após a limpeza do rolamento, o balanceamento foi desnecessário.

Bloch (2000) em seu capítulo sobre o desempenho dos lubrificantes sintéticos, ressalta a melhoria conseguida através da utilização dos mesmos em rolamentos de um soprador, anteriormente lubrificadas por óleo mineral. Os picos de velocidade foram consideravelmente reduzidos após a utilização de lubrificantes sintéticos, possivelmente devido a seu maior peso molecular, entre 3 a 5 vezes superior ao dos óleos minerais, conforme verificado na figura 5-1 abaixo.

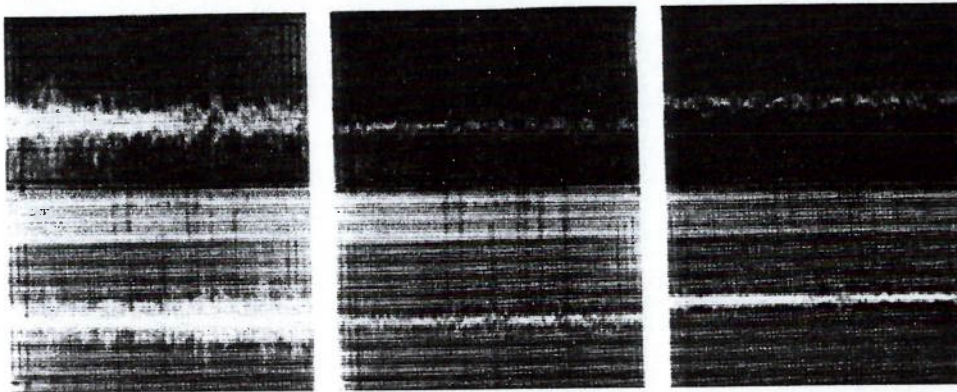


Figura 5-1 Pulsos de choque de vibrações da bomba de óleo de um compressor (Bloch, 2000)

5.2.1. Utilização de emissão acústica na detecção da lubrificação

A tecnologia de emissão acústica (E A) têm cada vez mais sido aplicado com sucesso no monitoramento de defeitos iniciais em rolamentos bem como na avaliação da eficiência da lubrificação.

Smulders; Kadushin (1994) em seu artigo discorrem a respeito das técnicas de envelope de sinais de aceleração e E A de alta frequência, como sendo bastante apropriadas para a identificação de defeitos iniciais em rolamentos. Relatam que a maioria dos defeitos em estágios iniciais em rolamentos se manifestam como respostas a pequenos impulsos, que geralmente não são percebidos por medidas normais de velocidade e aceleração. Registra a efetividade do envelope de emissão acústica na detecção inicial de estados de lubrificação inadequada, ocasionada por rompimento do filme lubrificante.

Ziogas et al (1987) apresentam em seu artigo um modelo teórico de diagnóstico da lubrificação através de parâmetros de vibração em altas frequências. Colocam que a espessura do filme de óleo e a qualidade do lubrificante afetam os parâmetros de vibração em altas frequências. Segundo eles, a adequada lubrificação de rolamentos de esferas em condições de operação normal podem ser determinadas por um sistema com “n” parâmetros formando uma função de densidade de probabilidade para rolamentos adequadamente e não adequadamente lubrificados. Foi desenvolvido um espectro de vibração de alta frequência a partir desse modelo para os dois modos de lubrificação. Por comparação entre espectros consegue-se avaliar a eficiência da lubrificação. O artigo também apresenta gráficos que correlacionam a rotação do rolamento com valores de vibrações em altas frequências, para rolamentos bem e mal lubrificados.

Andersson; Miettinen (2000) apresentam uma experiência envolvendo a detecção de contaminantes sólidos em graxas de rolamentos através de métodos de E A. Diversos experimentos foram realizados, tirando conclusões a respeito da influência do tamanho, dureza e concentração dos contaminantes.

SKF (1995) descreve a tecnologia “SEE”, detida pela SKF, baseada também em E A de altíssimas frequências (faixa de frequência entre 250 a 350 KHz), talvez seja atualmente a mais conhecida e aplicada na detecção de anormalidades devido a lubrificação e contaminação de lubrificantes. Jones (1996) cita a utilização da técnica como efetiva para a detecção de contatos entre as asperezas dos componentes do rolamento.

A figura 5-2, retirada de Almeida, Góz (1995) descreve simplificadamente o funcionamento da técnica, cujo número reportado fornece uma idéia da espessura da película lubrificante e conseqüente possibilidade de contato metal-metal entre as superfícies 1 e 2, que representam a esfera e a pista do rolamento respectivamente.

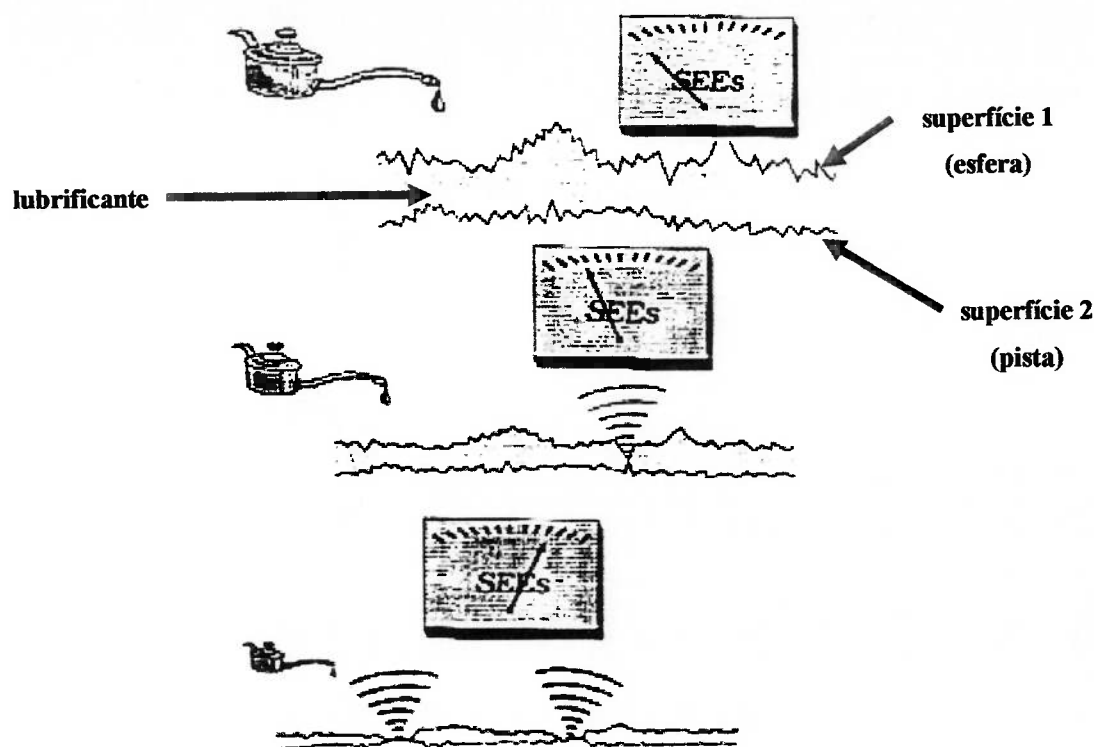


Figura: 5-2. Valores de "SEE" em função da película lubrificante

5.2.2. Utilização de acelerometria na detecção da lubrificação

Massouros (1983) descreve experimento no qual monitorou fases de amaciamento de mancais de deslizamento em lubrificação limite, através de acelerometria até 20 KHz e análise através do espectro de vibrações.

Um artigo abordando os efeitos da viscosidade do lubrificante e seus impactos na vibrações foi escrito por Su et al. (1992). Nesse artigo, a espessura do filme de óleo lubrificante é modelada segundo equações empíricas. Isto faz com que o espectro de vibrações siga um modelo de distribuição padrão de igual espaçamento de frequência (EFSD). Em sua parte experimental, uma série de medições envolvendo rugosidades das pistas e dos rolos do rolamento são realizadas. Espectros demodulados do sinal são gerados, variando-se tanto a pré-carga de montagem dos rolamentos, como a viscosidade do lubrificante e o nível de óleo que lubrifica o mesmo. Através de seus experimentos, os autores conseguem mostrar que a viscosidade têm um efeito positivo sobre a tenacidade do filme e energia de vibração.

Duas conclusões são citadas. Primeiramente, que o espectro de vibração de rolamento normal pode ter um modelo EFSD devido às irregularidades da superfície,

que muitas vezes são engrandecidas com a elevação da velocidade de rotação. Em segundo lugar, a energia de vibração depende da viscosidade do lubrificante, da pré-carga inicial e da rotação. Dessa forma sobre altas pré-cargas e baixas velocidades de rotação, a utilização de elevadas viscosidades induzirão a baixas tenacidades de filme e baixas energias de vibração. Por outro lado, com elevadas velocidades e com óleos de alta viscosidade, tanto a dureza do filme como a energia de vibração serão elevadas.

Essas considerações envolvendo a influência da rotação no sinal de vibração mostram que essa variável importante deverá ser considerada em nossa parte experimental.

Berry (1991) sugere que observações na assinatura dos sinais de vibrações especificamente na faixa de frequências entre 900 e 1600 Hz, fornece boas indicações a respeito da instalação e lubrificação adequadas. Descreve quatro estágios de evolução do espectro de frequência, desde o estágio inicial até aquele que precede a falha catastrófica.

Azovtsev, Barkov, Yudin, descrevem em seu artigo o desenvolvimento de um programa que utiliza uma metodologia automática de diagnóstico de falhas em rolamentos, baseada em defeitos caracterizados por modulação de frequências. Descrevem que todas as propriedades das forças de atrito para cada tipo de defeito são detectadas pela análise do espectro do envelope da vibração do rolamento, a uma banda de frequência de 1/3 de oitava, cerca de 10 KHz. Sugere doze frequências de modulação de defeito nos rolamentos, e entre elas os defeitos de lubrificação.

5.3. Monitoramento da contaminação em lubrificantes através de vibrações

Apenas uma referência e um resumo foram conseguidos após extensa revisão bibliográfica a respeito dos impactos da contaminação na lubrificação.

Peng; Kessissoglou (ano não informado) reportam uma experiência prática numa caixa de engrenagens, na qual informações sobre de vibrações e resíduos de desgaste no óleo foram correlacionadas. Testes em operação normal, lubrificação imprópria e com a presença de partículas contaminantes foram realizados. A detecção da falha através da assinatura do sinal de vibrações foi comparada com a análise das partículas. Os resultados do artigo ofereceram uma maior compreensão

da regras de dependência e independência entre análise de vibrações e análises de resíduos de desgaste no monitoramento da condição da máquina e no diagnóstico da falha.

Komiya (1992) reporta em seu artigo os resultados dos impactos da contaminação em lubrificantes através da utilização de técnicas simultâneas de registro de vibração e contagem de pulsos. Foram utilizados na parte experimental rolamentos de esferas, óxido de alumínio como contaminante e misturas lubrificantes a base de óleo ISO 10 filtrado e diversos tipos de graxas, misturando-se 0,25 ml de óleo em 0,85 g de graxa. Uma rotação e uma única carga axial foram aplicadas ao rolamento. Um acelerômetro foi instalado junto ao anel externo do rolamento e foram medidas a contagem de pulsos, o nível de ruído e os valores de RMS das vibrações. Foram estudados os efeitos do tamanho da partícula de contaminante e de suas concentrações, além da viscosidade dos óleos e a consistência (penetração trabalhada, ASTM D 217) das graxas, conforme figuras 5-3 e 5-4.

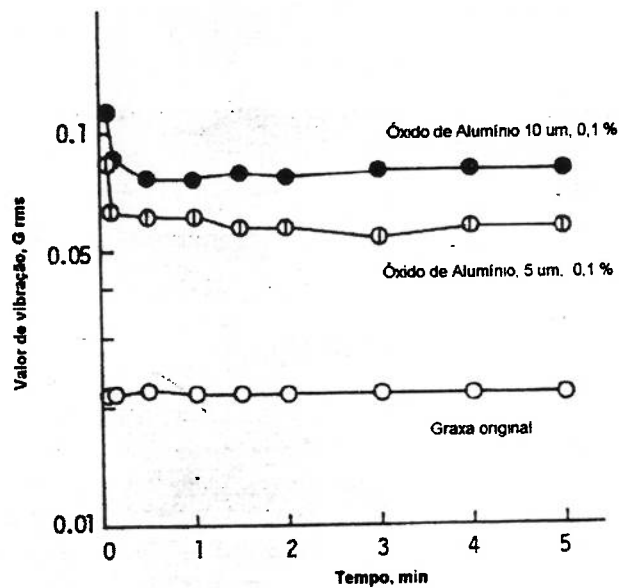


Figura 5-3 Valor da vibração X Tempo em função do tamanho do contaminante na graxa (Komiya, 1992)

* adaptado e traduzido pelo autor

Foram realizadas experiências apenas com graxas, apenas com óleos e com uma mistura graxa-óleo com a finalidade de dispersar os meios contaminantes na graxa.

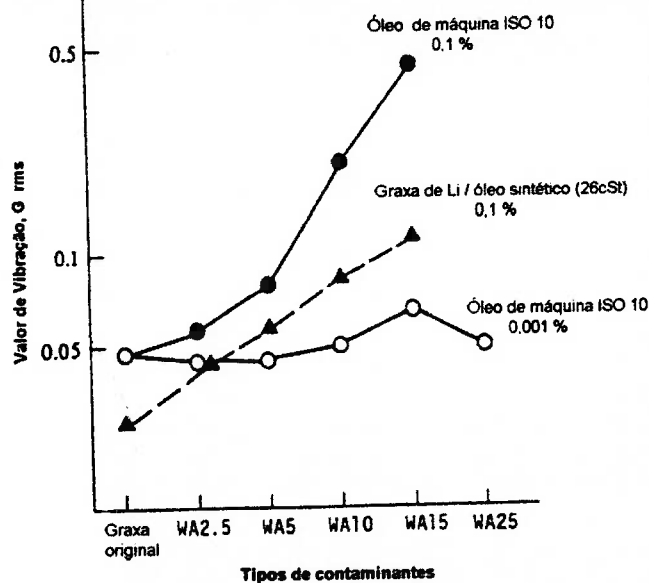


Figura 5-4 Valor de vibração X Tipo e tamanho de contaminantes (Komiya, 1992) * adaptado e traduzido pelo autor

As principais conclusões descritas foram:

- testados ao longo do tempo, maiores tamanhos de partículas na mistura induziram a valores mais elevados de vibração e pulsos acumulados;
- para baixíssimas concentrações de contaminante no óleo, o efeito do tamanho do contaminante é desprezível no valor de vibrações;
- para uma mesma concentração, o tamanho do contaminante aumentou o nível de vibração;
- entre dois contaminantes de mesmo tamanho, o contaminante testado com maior concentração apresentou maior nível de vibração;
- o tamanho de contaminante reconhecido como responsável pelo ruído de contaminação foi de cerca de 10 μm ou maior;
- os testes onde a penetração trabalhada ou consistência foi aumentada, deixando a graxa mais fluida, também favoreceram o aumento do número de pulsos ;
- o ruído de contaminação têm uma relação relativa com o ruído de vibrações dos rolamentos, ou seja, quando o ruído é baixo, o tamanho de contaminantes detectável como causador do ruído de contaminação é muito menor do 10 μm .

6 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordados os detalhes de como foram preparados e realizadas os ensaios experimentais. Para uma melhor compreensão dos procedimentos adotados, este capítulo que descreve a parte experimental do trabalho foi dividido nos seguintes tópicos:

- Bancada de testes;
- Principais componentes da bancada;
- Contaminantes;
- Óleos lubrificantes e procedimentos de contaminação;
- Cadeia de medidas;
- Procedimentos de ensaios;
- Processamento dos sinais;
- Tabelas de dados.

6.1 Bancada de testes

Foi construída uma bancada de testes, concebida inicialmente para isolar adequadamente os efeitos de vibrações externas e que fosse capaz de poder registrar a influência da contaminação sólida em rolamento lubrificado por um banho de óleo, e que é mostrada nas figuras 6-1, 6-2 e 6-3.

A bancada consta de uma mesa rígida de chapas de aço carbono soldadas a barras laterais de apoio sob as quais foram inseridos amortecedores do tipo *vibro-shocks*, a fim de se minimizar a influência de vibrações externas aos ensaios. É composta de uma estrutura plana superior onde foram montados o eixo de acionamento, os rolamentos de sustentação e a caixa de óleo com o mancal de teste. Num plano abaixo deste, foi soldada uma segunda estrutura de chapas onde foi fixado o motor elétrico de acionamento, conforme figura 6-2.

A aplicação da carga ao rolamento foi realizada através de um braço de alavanca ligado a contra pesos de massa conhecida, que amplificava o carregamento radial a ser aplicado no mancal de testes, conforme figura 6-1.

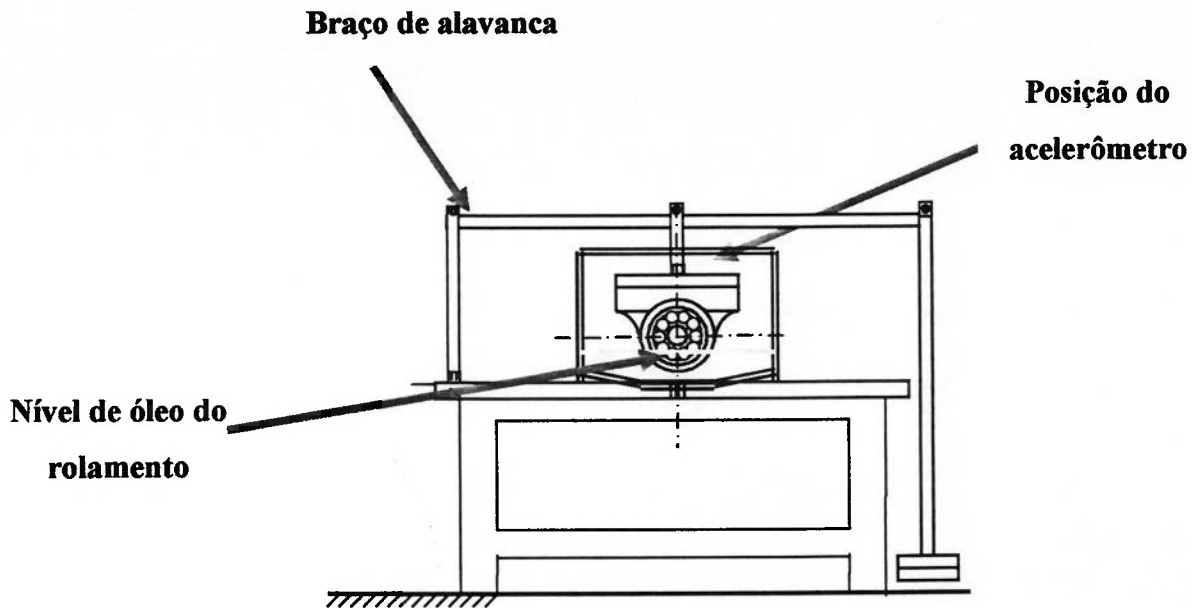


Figura 6-1 Esquema da bancada de teste – vista frontal

O motor elétrico de 0,5 HP cuja rotação foi controlada através de um variador de frequência, teve sua ponta de eixo fixada a uma polia V de dois canais que transmitia sua rotação ao eixo de acionamento na relação 1:1,16.

O eixo de acionamento foi apoiado em 2 mancais bi-partidos tipo caixa modelo SNA, fixos rigidamente à bancada, distantes cerca de 248 mm, dentro das quais estão inseridos 2 rolamentos rígidos de esferas 6306 vedados e lubrificados a graxa. Na ponta desse eixo foi montado um mancal de ferro fundido n.o 505, tendo no seu interior o rolamento de teste, com sua base de fixação paralela à superfície da mesa, no qual será aplicado a carga radial, conforme mostrado nos esquemas das figuras 6-1. e 6-2..

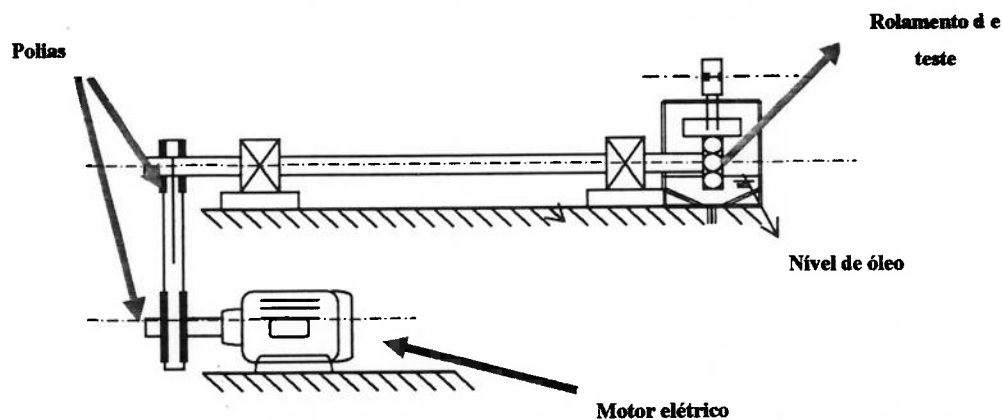


Figura 6-2 Esquema da bancada de testes – vista lateral

O rolamento de teste 6205, rígido de uma carreira de esferas aberto, foi montado no mancal bipartido entre dois calços de latão retificados, de modo a não apresentar folgas axiais quando a caixa estivesse fechada.

A fixação do furo do rolamento na ponta do eixo de teste atendeu a classe de tolerância k5 (leve interferência), de modo a facilitar as operações de montagem, desmontagem e limpeza do conjunto. O conjunto montado do mancal e do rolamento foi parafusado axialmente ao eixo, de modo que o anel interno do rolamento ficasse solidário ao eixo e a carga rotativa aplicada se desse apenas no anel interno do rolamento

Para a aplicação de cargas no conjunto de teste foi projetado um sistema de carregamento articulado, constituído de uma barra de aço tipo alavanca que permitiu a variação de cargas no sentido radial através da adição de massas previamente calibradas, conforme pode ser visto na figura 6-3. Desse modo pôde-se aplicar cargas radiais efetivas de 36,58, 85,78 e 136,45 kg, já computadas os valores de peso do conjunto mancal –garfo, da barra de porta pesos e dos contra pesos propriamente ditos.

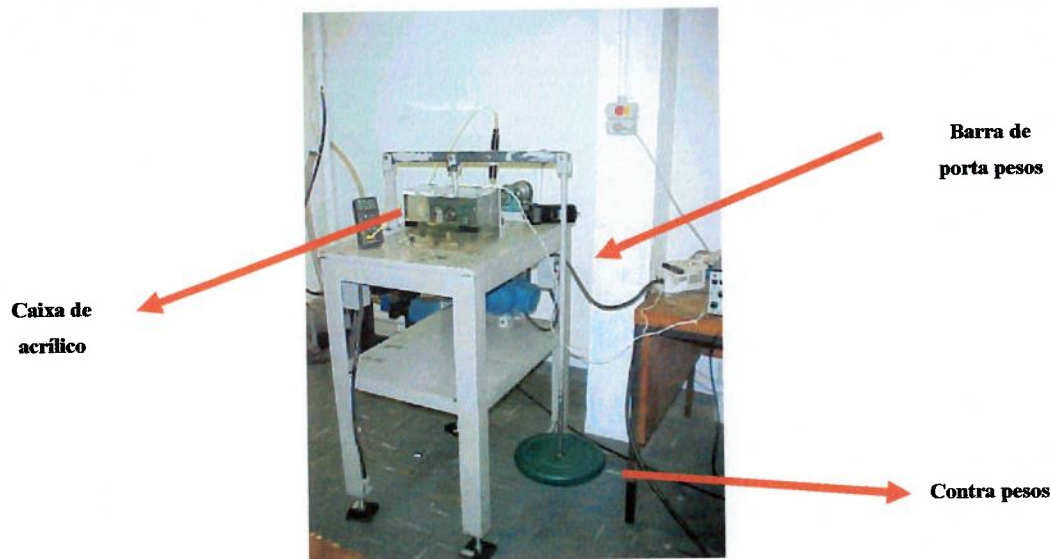


Figura 6-3 Bancada experimental

Na ponta do eixo de acionamento, o conjunto mancal/rolamento de teste foi isolado através de uma caixa de acrílico, tendo seu fundo parafusado tanto á base da mesa como a um anteparo rígido de aço. Essa configuração facilitava a drenagem do óleo testado, a desmontagem e a limpeza do conjunto após os experimentos.

Através dessa forma construtiva, o rolamento permanece em banho de óleo com nível fixo e temperatura constante, os óleos com contaminantes podem ser inseridos, agitados (quando necessário) e drenados com facilidade e todo funcionamento do conjunto pode ser observado adequadamente, conforme figura 6-4..

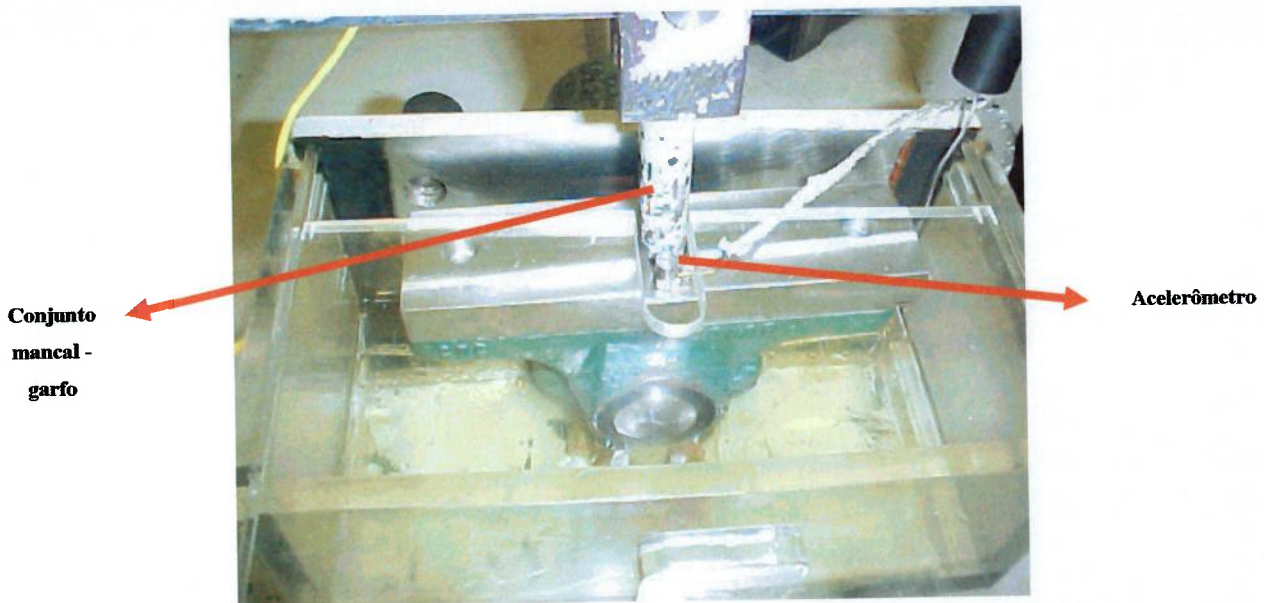


Figura 6-4 Conjunto mancal-garfo e reservatório do banho de óleo

Na base superior da caixa do mancal foi parafusado o acelerômetro de elevada sensibilidade para registrar o nível de vibrações do rolamento, conforme figura 6-4., que através de cabo enviava as informações para o conjunto de aquisição. Também eram monitorados continuamente a temperatura do banho de óleo, através de termopar e termômetro de bulbo de mercúrio e a rotação do eixo de acionamento por tacômetro ótico.

6.2 Principais componentes da bancada

Seguem abaixo as características construtivas dos principais componentes da bancada:

- Motor elétrico WEG de 0,5 HP, 2 polos, 220 V, rotação máxima de 3380 rpm,
- Variador de frequência marca Toshiba, modelo VF-ST, tensão de 220 V e potência de 0,4 kw, capaz de variar a frequência do motor entre 0 e 60 hz;
- Transmissão da rotação do motor para o eixo através de polias em V motora e duas correias trapezoidais;
- Eixo de aço 1020, acabamento retificado com tolerância IT 7, diâmetro nominal de 30 mm (exceto na ponta de eixo do rolamento teste) e comprimento de 500 mm, dimensionado ao cisalhamento e a flexão, onde foram montados uma polia movida com correias em V e dois mancais de apoio,

- Dois rolamentos de apoio rígidos de esferas tipo 6306, conforme figura 6-5., montados em duas caixas tipo SN, com vedadores tipo feltro, vedados e lubrificados para a vida com graxa de sabão de lítio e óleo mineral conforme norma DIN KP2 K;

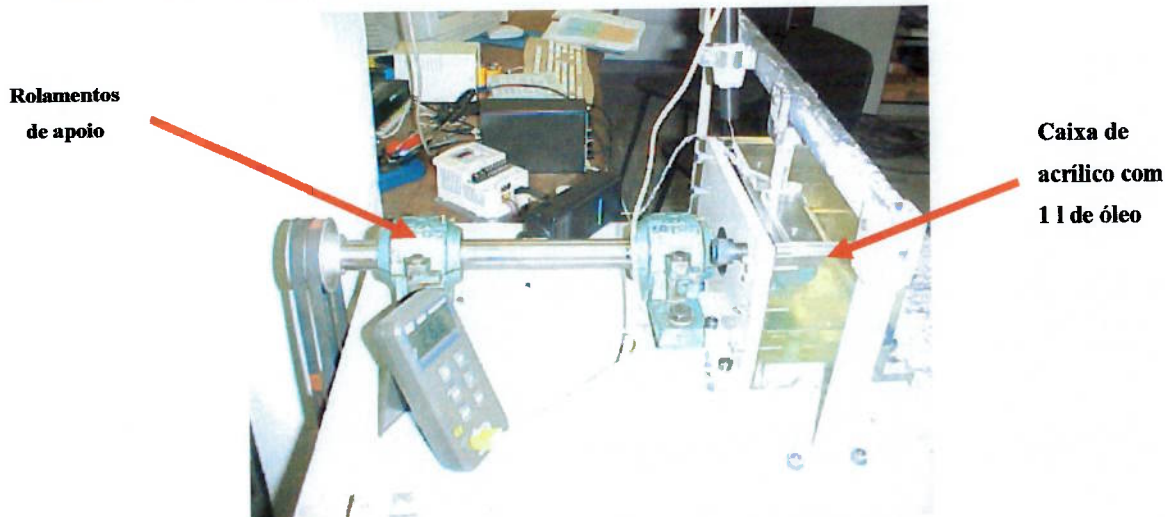


Figura 6-5 Detalhe superior da bancada de testes

- Caixa de acrílico com volume de óleo até a primeira esfera do rolamento de teste, volume equivalente a 1000 ml, conforme figura 6-5, dotada de fundo cônico para drenagem do óleo, abertura superior para passagem de fios de instrumentação (vibração e temperatura); rolamento de teste 6205, marca NSK, com uma carreira de esferas, escolhido devido a sua baixa tolerância a desalinhamentos, pois teoricamente trabalha sobre um ponto de contato. Fabricado em aço SAE 52100, com dureza de pistas entre 60 e 64 RC e dureza de esferas entre 58 e 62 RC, gaiola de aço 1020, folga normal e precisão de giro “standard”. O rolamento possui 7 esferas, têm diâmetro interno de 25mm, diâmetro externo de 47 mm, largura igual a 12 mm, C din igual a 14400 N ou 1430 kgf, com rugosidades informada pelo fabricante, sendo de 0,08 (Ra) para as pistas e 0,032 (Ra) para as esferas. O limite de rotação com óleo é igual a 18000 rpm. A interferência entre anel externo e face interna da carcaça foi H7.

6.3. Contaminantes

A escolha do contaminante para as experiências envolveu também a opinião de especialistas. Através da consulta a laboratórios especializados na detecção de partículas sólidas em óleos lubrificantes, constatou-se que em amostras de óleos

usados de um modo geral, submetidos a ensaios de ferrografia analítica, era frequente a presença de partículas amorfas de silício, com tamanhos variando entre 20 e 100 μm . Sabe-se que esse tipo de contaminante se origina tanto por limpeza deficiente durante a fase de posta em marcha (conforme observado na figura 1-1.), como também é resultado do ingresso de partículas no sistema durante a operação dos componentes.

Smallman e Bishop (1995) definem a sílica (SiO_2) como um mineral largamente utilizado nas indústrias de aço e de vidros. Segundo eles, a sílica possui três principais formas cristalinas modificadas em função da temperatura, que são a cristobalita, a tridimita e o quartzo, este último com modificações β hexagonal e α trigonal, apresentando densidades de 2600 e 2650 kg/m^3 , respectivamente. Apesar de ser considerada inicialmente como frágil, o fato da sílica apresentar várias formas cristalinas que dependem da temperatura e transformações que envolvem deslocamentos de ligações e reorientações das direções das ligações, fazem com que, segundo Smallman, Bishop (1995), “ seu comportamento durante a secagem no forno e posteriormente em condições de serviço seja um assunto complicado, particularmente pela presença de outras substâncias podem tanto catalizar ou esconder transformações”.

Retirada de Moffatt *et all* (1968), duas estruturas da sílica, o quartzo beta e a cristobalita são representadas na figura 6-6..

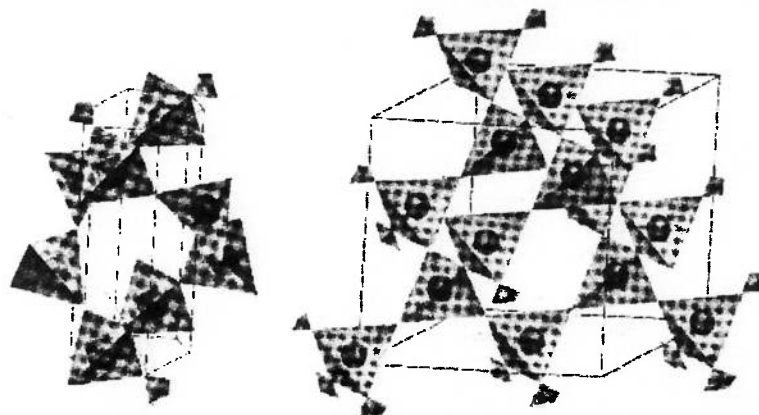


Figura 6-6 Duas das formas cristalinas do SiO_2 , mostrando as ordenações dos tetraedros Si-O (Moffatt, 1964)

Moffatt *et al* (1968) classifica as variedades de quartzos como cristais iônicos covalentes de baixo número de coordenação, poliedros aniônicos dispostos na forma empilhada para manter sua neutralidade elétrica e minimizar sua energia de ligação por unidade de volume, sem introduzir fortes repulsões entre íons de carga igual.

Hayden *et al* (1967) definem a sílica como materiais não metálicos inorgânicos de comportamento frágil, que no entanto sob procedimentos experimentais controlados, em algumas de suas formas cristalinas podem apresentar-se muito dúteis.

As amostras de sílica utilizadas nas experiências do presente trabalho foram obtidas comercialmente e trabalhadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Eng. de Minas e do Petróleo –LCT – Poli. Foram inicialmente trituradas em moinho de rolos para em seguida serem submetidas a moagem complementar em moinho de bolas de ágata, num equipamento chamado de *Pulverizete I*, da marca Fritsch, a fim de se obter os pós em diversas faixas de tamanho.

Na figura 6-7. têm-se uma idéia da forma do contaminante original e após moagem de pulverização.



Figura 6-7. Quartzo em lascas e após moagem

Retira-se de Booser (1984) que o material quartzo (SiO_2) apresenta dureza média de 7 Mohs, o que equivale na escala de dureza Vickers a cerca de 1000 HV. .

Mesmo sabendo-se que o valor da dureza do contaminante era praticamente o mesmo das pistas e esferas do rolamento de teste, esse contaminante foi escolhido de forma que as condições experimentais fossem adequadas para não produzir efeitos catastróficos no rolamento durante os experimentos . A dureza das pedras foi checada experimentalmente através dos método de Oliver-Pharr (Oliver; Phar,1992), embutindo-se uma amostra do mineral e fazendo uso do nano-durômetro existente no Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS/ Poli.

Após uma seqüência de endentações e a utilização de cálculos e metodologia disponível em programa específico de cálculo, o resultado médio fornecido foi de 910 HV, bastante próximo ao da literatura consultada. A conversão para dureza Rockwell C resulta em aproximadamente 67 RC. Considerando-se as tolerâncias e aproximações, foi considerado que as pistas do rolamento e o contaminante tinham praticamente a mesma dureza.

Um conjunto de parâmetros estabelecidos como condições experimentais são:

- Contato de lubrificação inicialmente E H, em regime misto ou hidrodinâmico;
- Lubrificação contínua por banho de óleo;
- Baixas temperaturas de aplicação;
- Óleo lubrificante com elevado I.V. (índice de viscosidade);
- Rotações relativamente baixas (máxima rotação = 3600rpm), se comparadas com o limite de rotação do rolamento que é de 18000 rpm, portanto apenas 20 % de sua velocidade limite;

- Relação C / P da aplicação baixa, onde C = capacidade de carga dinâmica e P = carga equivalente, para a maior condição de carga teremos $C / P = 10,48$, bastante baixa e adequada para rolamentos;
- Tratava-se de uma montagem de mancal em rolamento em banho de óleo agressivo, e não um ensaio dinâmico de deslizamento ou rolamento em meio abrasivo lubrificado;
- O tempo de operação em cada condição contaminada seria extremamente pequeno (menor que 1 hora para cada um dos quatro rolamentos);

Nestas condições, são fortes as possibilidades de não ocorrerem desgastes catastróficos no rolamento, mesmo em contato com uma abrasivo com dureza da mesma ordem de grandeza do rolamento.

Sayles; Macpherson *apud* Jacobson (1982), durante seus experimentos envolvendo testes de vida de rolamentos, mostraram que a utilização por 30 minutos de amaciamento em lubrificante contaminado (de dureza não reportada) cobriu cerca de 8 % a superfície com endentações, diminuindo em 10 vezes a duração da vida de um rolamento de rolos. As endentações das partículas de aço naquele óleo tornaram impossível a operação do componente mesmo o lubrificante foi limpo.

Apesar de nossa condição experimental ter sido projetada para não provocar endentações catastróficas nos componentes do rolamento, esta foi uma de nossas preocupações, visto que a concepção experimental contempla a contaminação dos rolamentos com elevada concentração de partículas cujo tamanho médio foi sempre superior a espessura do filme lubrificante. Ou seja, durante os experimentos esperase por uma modificação “forçada” do regime de lubrificação, que poderia estar passando de elasto-hidrodinâmico, com deformações elásticas dos componentes, para um regime de lubrificação mista ou limite, devido a entrada de contaminantes duros na conjunção de lubrificação E-H.

Uma vez obtido o pó de sílica, iniciou-se a classificação em faixas de tamanhos conhecidos, fazendo-se uso da técnica tradicional de peneiramento por via úmida. Essa técnica consiste em molhar a massa de pó a ser peneirado em água e iniciar o peneiramento da mistura pó-água. Parte-se da peneira de malha mais aberta

para a seguinte mais fechada, e assim sucessivamente. Ou seja, colocou-se toda a massa de pó de quartzo moído molhado sobre a tela da peneira com abertura de tela de 105 μ m, e mediante agitação contínua da peneira imersa numa bacia cheia de água, inicia-se a separação das partículas por frações granulométricas. O tamanho das aberturas das malhas metálicas das peneiras foram previamente escolhidos, seguindo a classificação apresentada na tabela 6-1.

Tabela 6-1 – Seqüência de malhas de peneiras para classificação granulométrica do pó de quartzo (LCT, 2003 a)

MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)
20	0,840
28	0,597
35	0,420
48	0,297
65	0,210
100	0,149
150	0,105
200	0,074
270	0,053
325	0,044
400	0,037
635	0,020

Conforme tabela 6-1, para a execução da separação granulométrica dos contaminantes utilizados na parte experimental, foram usados as peneiras de malha 0,105, 0,074 (ou 0,075), 0,053, 0,044, 0,037, 0,020.

Uma vez a mistura úmida separada em classes conhecidas, cada lote de partículas separadas foi depositado em bacias de alumínio previamente limpas. A seguir essas bacias foram levadas a estufa, a uma temperatura de 60°C para secagem completa. O volume de pó de tamanho inferior a 20 μ m teve que ser previamente decantado por um dia.

Após a retirada da estufa, cada fração granulométrica teve sua massa pesada em balança analítica de precisão centesimal.

O resultado final do peneiramento é mostrado na tabela 6-2. Das 174,38g de pó de quartzo pulverizado que originariamente iniciaram o peneiramento, foram medidas 171,55g, mostrando uma perda no processo de cerca de 1,62%, considerada normal devido a pequena quantidade de massa inicial.

Tabela 6-2 Resultados da análise granulométrica do quartzo pulverizado (LCT, 2003a)

		RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO				 LCT - EPUSP
Cliente:	Marcello		Projeto:	Mestrado/Ladin		
Material:	Quartzo pulverizado		Responsável:	Marcello		
Tipo de peneir.	A úmido		Local:	LCT		
Massa inicial (g):	174,38		Data:	7/8/03		
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACUMULADA ACIMA	% ACUMULADO ABAIXO	
150	0,105	71,53	41,70	41,70	58,30	
200	0,074	15,09	8,80	50,49	49,51	
270	0,053	16,22	9,45	59,95	40,05	
325	0,044	5,50	3,21	63,15	36,85	
400	0,037	13,71	7,99	71,15	28,85	
450	0,032	1,68	0,98	72,12	27,88	
635	0,020	16,20	9,44	81,57	18,43	
Decantação	0,010	31,62	18,43	100,00	0,00	
MASSA FINAL (g):		171,55	PERDAS:	2,83 g	1,62 %	

Essas partículas foram utilizadas em algumas dos ensaios iniciais. Numa segunda fase de ensaios, trabalhou-se exclusivamente com as faixas de tamanho entre 0 e 20 μm e entre 53 e 75 μm .

Para essas duas últimas faixas de tamanho de partículas, utilizadas na quarta fase experimental, foram realizados ensaios de análise granulométrica por espalhamento em luz laser de baixo ângulo, segundo procedimento que atende a norma ISO 13321, num equipamento MasterSizer da marca Malvern. Esse tipo de ensaio permite classificar percentualmente a distribuição em volume das partículas

da amostra, além de fornecer o diâmetro médio da partícula, e seu tamanhos de 10, 50 e 90 % acumulados abaixo para a população de particulado na amostra. Observou-se através dos resultados dos ensaios de análise de tamanho de partículas, que o volume de partículas entre 0 e 20 μm apresentou um diâmetro médio de partículas de 16 μm , conforme figura 6-8. Para a faixa de tamanhos entre 53 e 75 μm , o diâmetro médio da partícula encontrado foi de 86 μm , conforme figura 6-9. Esta extrapolação explica-se em parte pelo próprio método de peneiramento que por ser um método de retenção em um único plano, pode deixar passar tamanhos de partículas com volume médios superiores aos das faixas de peneiramento utilizadas.

Os laudos dos ensaios referentes a esses dois grupos de partículas encontram-se nos Anexos 2 e 3.

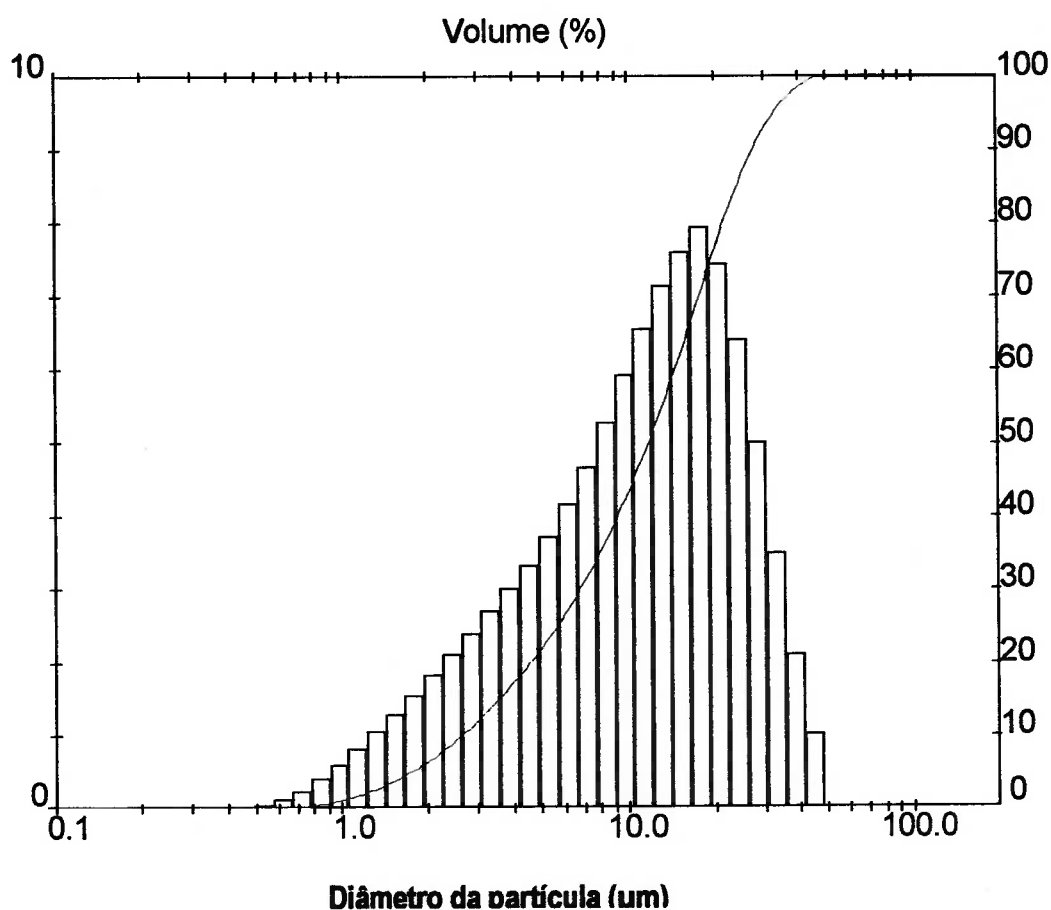


Figura 6-8 Resultados de Análise de Tamanho de Partículas de quartzo com tamanho < 20 μm (Anexo 2)

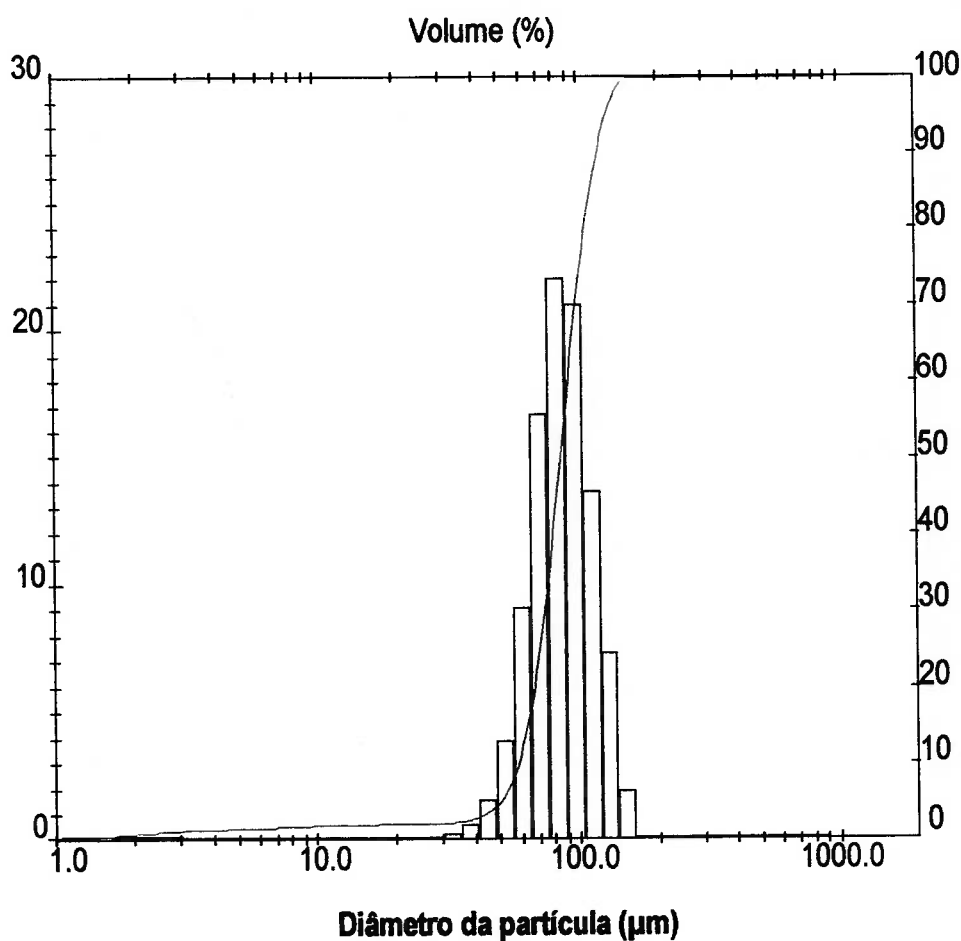


Figura 6-9 Resultados de Análise de Tamanho de Partículas de quartzo entre 53 a 75 µm (Anexo 3)

É importante frisar que dentro da faixa de contaminantes utilizados sempre estarão presentes partículas maiores, iguais e menores que aquelas originariamente classificadas pelo método de peneiramento.

Uma vez de posse do contaminante dentro das faixas de tamanho desejadas, foram preparadas amostras de óleo para cada condição experimental.

6.4 Óleos lubrificantes e procedimentos de contaminação

Foi utilizado nas experiências um óleo lubrificante básico parafínico e mineral puro, Neutro Leve, ISO 32, com viscosidade cinemática nominal de 32 cSt a 40°C. As características típicas do lote desse lubrificante encontram-se no **Anexo 4**.

A utilização de um lubrificante isento de aditivção se justifica pelo fato de que interações químicas entre as superfícies no contato lubrificado não foram objetos de avaliação, preferindo-se assim eliminar essa importante variável que poderia modificar as condições do contato. Assim, preferiu-se durante as experiências, fixar o tipo de óleo e sua viscosidade, variando-se apenas parâmetros de operação e condições de contaminação;

A fim de conseguir um nível de contaminação inicialmente baixo, necessário a primeira parte da experiência, o volume de óleo foi submetido a uma filtração externa conforme figura 6-10.



Figura 6-10 Sistema de filtração do óleo lubrificante

Foi realizada filtração absoluta prévia no óleo de teste através de filtro de pressão de 10 μm , – marca HDA modelo FP 10 010 FV 06 B LV3, Betaplus 10, com $\beta_{10} \geq 200$, sendo a mesma realizada no próprio laboratório, que conta com um sistema motor-bomba-filtro incorporados. Dessa forma garantiu-se que o nível de contaminação do óleos tanto para a condição isenta de contaminação como para as condições prévias à inserção de contaminantes nas amostras de óleo eram extremamente baixas.

Uma vez de posse do óleo filtrado e dos contaminantes, passou-se a elaborar as amostras de óleos contaminados referentes as diversas condições experimentais. Para tanto, fez-se uso de frascos de plástico e de uma balança analítica. As massas de

quartzo eram rigorosamente pesadas em balança com precisão milesimal e adicionados aos frascos vazios. Em seguida, media-se com Becker graduado o volume de 1 litro de óleo limpo. Esse volume era vertido para o interior do frasco. Em seguida, mediante agitação constante a frio, o contaminante era solubilizado no óleo. Dependendo Em função do tamanho e da concentração do poluente, observaram-se para algumas condições, a decantação do contaminante no fundo dos frascos.

As amostras preparadas utilizadas em cada experimento estão descritas na tabela 6-3.

Tabela 6-3: Descrição das amostras de óleo utilizadas nos experimentos

	Volume de óleo (l)	Faixa de tamanho de quartzo (μm)	Massa de Quartzo (g)	Concent.	Nome da condição experimental
1.ª Fase	1	Nenhum	Nenhum	0	“s q “ (contaminação natural do óleo)
2.ª Fase	“	38 a 32	1,0	1,0 g/l	“3 d “
	“	75 a 53	1,0	1,0 g/l	“7 d “
	“	105 a 75	1,0	1,0 g/l	“1 d “
3.ª Fase	“	105 a 75	0,010	0,010 g/l	“1 a “
	“	“	0,020	0,020 g/l	“1 b “
	“	“	0,10	0,10 g/l	“1 c “
	“	“	1,0	1,0 g/l	“1 d “
	“	“	2,0	2,0 g/l	“1 e “
	“	“	5,0	5,0 g/l	“1 f “
4.ª Fase 1º tamanho	“	20 a 0	0,10	0,10 g/l	“2 c “
	“	“	1,0	1,0 g/l	“2 d “
	“	“	5,0	5,0 g/l	“2 f “
	“	“	10,0	10,0 g/l	“2 g “
4.ª Fase 2º tamanho	“	75 a 53	0,10	0,10 g/l	“7 c “
	“	“	1,0	1,0 g/l	“7 d “
	“	“	5,0	5,0 g/l	“7 f “
	“	“	10,0	10,0 g/l	“7 g “

Analisando-se a tabela 6-3, observa-se que a mesma condição de concentração “7 d “ foi utilizada tanto na 2ª como na 4ª fase, sendo que a diferença

foi que tivemos agitação forçada de banho somente na 4^a fase. Da mesma forma, a condição “1 d”, foi utilizada nos experimentos referentes às 2^a e 3^a fases

A partir do momento que toda a instrumentação da bancada estava preparada, as amostras de óleo eram derramadas no interior da cuba.

6.5. Montagem do conjunto de teste

O primeiro passo para se iniciar a aquisição de dados era a montagem do rolamento no mancal de teste.

Rolamentos NSK 6205 novos foram fornecidos com a informação prévia do valor de sua folga radial original medida. Em virtude do rolamento ser fornecido com óleos protetivos anti corrosivos, submetia-se os mesmos a uma lavagem prévia. O mesmo era lavado em banho de ultrassom inicialmente com solvente *thinner* e em seguida com álcool isopropílico. O mesmo procedimento era realizado com os dois anéis de encosto do rolamento. A caixa do rolamento também era previamente lavada e desengraxada. Em seguida montava-se o rolamento no alojamento da caixa entre os dois anéis, fechava-se e parafusava-se a mesma. Tomava-se cuidado de não girar o rolamento para não provocar riscos nas pistas e esferas.

Em seguida, fazendo uso de uma morsa, fixava-se o garfo de transmissão na base roscada do mancal de teste, conforme figura 6-4. No furo foi colocada uma arruela de pressão de modo a tornar essa fixação o mais rígida possível. O mancal com garfo era introduzido no eixo da bancada, entrando com leve interferência. Ele era travado axialmente no eixo com um parafuso, fazendo com que o anel interno do rolamento ficasse solidário ao movimento do eixo.

O acelerômetro foi então fixado na base superior do mancal e conectado por cabo ao amplificador de carga.

Em seguida, fazendo uso de pinos de aço dimensionados ao cisalhamento, se fixava o braço da alavanca em três pontos: no braço esquerdo que era fixo á bancada, ao garfo do mancal e à barra suporte de contra pesos. Dessa forma garantia-se que toda a carga vertical aplicada pelos contra pesos eram ampliadas por ação do momento do braço e aplicadas radialmente ao mancal de teste. O termopar foi fixo na barra de transmissão de força, de modo a medir a temperatura do banho com seu filamento fixo sempre na mesma posição. O tacômetro era posicionado.

Em seguida, fixava-se a caixa de acrílico, parafusando seu fundo na base da bancada e sua face aberta na placa de apoio frontal. O ralo da caixa era posicionado de modo a não permitir a saída do volume do óleo de teste

Com o sistema todo montado, vertia-se o lubrificante de teste no interior da caixa. Acionava-se o motor elétrico através do variador de frequência e o conjunto entrava em funcionamento.

Quando se mediu vibrações conjuntamente com o aparelho de contagem de partículas, adaptava-se uma mangueira coletora de fluido no interior do banho e posicionava-se a mangueira de retorno de fluido no lado oposta ao da sucção, conforme figura 6-13.

Também neste momento, ajustava-se o termostato para aquecimento do banho de óleo.

Realizava-se uma checagem geral nos acionamentos, verificando ruídos e possíveis vazamentos. Feita esta avaliação e não encontrando anormalidades, o conjunto era considerado apto para ensaios.

6.6. Cadeia de medidas

Foi utilizado uma instrumentação para monitoramento da vibração, da rotação do eixo e monitoramento da temperatura do banho de óleo. Os componentes da bancada de aquisição de dados de vibrações foram compostos por:

- Acelerômetro piezoelétrico Brüel & Kjaer, modelo 4393
 - Sensitividade de carga: $0,320 \text{ pC/ms}^{-2}$
 - Sensitividade de voltagem: $0,427 \text{ mV/ms}^{-2}$
 - Meios de uso: selado contra umidade;
 - Range de temperatura: -74 até $+250 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Faixa útil de frequência: 0 até 10 kHz
 - Frequência de ressonância: 55 kHz
- Amplificador de carga e condicionador Brüel & Kjaer, tipo 2635
 - Faixa de amplificação – 0,1 até 10 kHz
 - Faixa útil de frequência: 0 até 100kHz
 - Sensibilidade ate 10V/pC

- Configuração utilizada:
 - Sensibilidade: 0.32
 - Lower acc: 2 Hz
 - Upper: 10 kHz
- Acelerômetro PCB, modelo 480B10 (utilizado nas aquisições com contagem de partículas simultânea)
 - Sensitividade de voltagem: $2,04 \text{ mV/ms}^{-2}$
 - Range de temperatura: -754 até $+121$ °C
 - Faixa útil de frequência: 0 até 10 kHz
 - Frequência de ressonância: 55 kHz
- Condicionador integrador PCB, modelo 480B10
 - Saída em aceleração
- Amplificador e Filtro de Passa Baixa Butterworth de 6° ordem
- Ganho variável de 1, 5, 10, 50, 100 e 500
- Frequência de corte variável de 100 Hz, 2, 5, e 10 KHz.
 - Configuração utilizada: Ganho de 100 Hz e Freq. Corte de 10 KHz
- Sistema de aquisição: Fabricação National Instruments, modelo: DAQpad – 6070E

Este equipamento tem uma resolução de 12 bits, com 16 terminais analógicos. Possui ganho de 1 – 2 – 5 – 10 – 20 – 50 e 100, de 0 a 10 V; e de –5 a 5 tem 0,5 - 1 – 2 – 5 – 10 – 20 – 50 e 100 para diversos níveis de sinais. A máxima taxa de amostragem (um canal) é 1,25 MS/s.

Para o monitoramento contínuo do banho de óleo foi utilizado um termômetro digital da marca TES, modelo TES 1300, faixa de temperatura de -50 a 1300 °C e resolução de $0,1$ °C . Foi conectado a ele o acessório TP-K02, termopar de arame indicado para a medição da temperatura de líquidos.

Para a verificação esporádica da rotação do eixo de acionamento utilizou-se um tacômetro de luz da marca Lutron, modelo DT 2236, que registrou as medições em rpm.



Figura 6-11: Cadeia de medidas

A figura 6-11 ilustra o aparato utilizado para as aquisições de vibrações.

6.7. Procedimentos de ensaios

Será descrito agora o procedimento utilizado para a aquisição dos sinais de vibrações e do registro da contaminação no óleo através do uso do contador de partículas.

6.7.1. Início da aquisição de dados

Com a parte mecânica toda montada e ajustada, acionava-se o filtro, a placa de aquisição e o programa LabView. Observa-se então o formato inicial do sinal de vibração na tela do computador.

Antes de dar início à aquisição de dados os ruídos de medição foram avaliados e registrados. Procurou-se obter um aterramento adequado de toda a instrumentação. Assim sendo, foram feitas verificações do nível de ruído com acelerômetros fora da bancada e acoplados na base de fixação do mancal. Os sinais foram coletados quando o nível de ruído era inferior a 5 % do nível máximo do sinal.

6.7.2. Parâmetros de aquisição

Alguns parâmetros experimentais foram impostos, medidos e calculados e outros foram apenas registrados. Na tabela 6-4, explica-se como alguns desses dados foram obtidos. A tabela que segue estabelece um resumo dos parâmetros utilizados nos ensaios. A designação N.A. identifica que a informação da tabela não é aplicável àquele item.

Tabela 6-4 Parâmetros experimentais

Parâmetro Experimental	Observação / Explicação	Faixa	Unidade	Categoria			
				Imposto	Medido	Calculado	Registrado
Tipo , n.o do rolamento	Esféras 6205 aberto	N.A.	N.A.	X			
Carga Radial no rolamento	Carga total aplicada	36,58 - 85,78 - 136,45	kg	X	X		
Rotação no eixo do rolamento	Regulada pelo. Variador de frequência	20, 30, 40, 50 e 60	Hz	X	X		X
Tipo de Lubrificante e Viscosidade Cinemática	Óleo mineral puro, Neutro Leve - 27 cSt	ISO 32	cSt a 40°C	X			
Medição da vibração	Aceleração no sentido radial	0 a 10 K	Hz	X	X		X
Parâmetros de aquisição	n.o de amostras, frequência de amostragem -fs	43000 21000	Pontos Hz	X			
Temperatura do banho de óleo	Monitorada por termômetros	26 a 28	°C	X	X		X
Nível do banho de óleo	½ última esfera, ou 1 litro de óleo na cuba	N.A.	N.A.	X	X		
Nível de contaminação do óleo	Norma ISO 4406	ISO	Qtde. Part./ 100 ml	X	X		X
Concentração de contaminantes no óleo	Gramas de quartzo / litro de óleo	De 0,010 até 10	g/l	X			X
Tempo de amaciamento do rolamento	Antes de se iniciar as medições	N.A.-	15 min	X	X		
Tempo de operação durante a experiência	Tempo de trabalho total do rolamento	Menos que 60 min	Min	X			X
Espessura do filme lubrificante	Apenas calculada teoricamente	0,6 a 0,9	µm	X		X	
Rugosidade superficial das pistas e esferas	Valor da rugosidade em si	N.A.	µm		X		X
Folga interna do rolamento	Valor da folga inerna	N.A.	µm	X	X		
Análise de resíduos de desgaste do óleo	Espectometria e Ferrografia	N.A.	N.A.		X		X
Análise das superfícies de trabalho do rolamento	Avaliação microscópica	N.A.	N.A.		X		X

Nas condições experimentais utilizadas, não foi possível medir a espessura do filme lubrificante do rolamento no banho de óleo. Pelas referências bibliográficas consultadas, considerou-se que esse parâmetro pode influenciar na assinatura dos sinais de vibrações. Porém, utilizando o modelo de Hamrock (1984) em seu capítulo sobre lubrificação elasto-hidrodinâmica, foi feita uma estimativa dessa espessura para cada condição experimental. Os dados utilizados para o cálculo são mostrados na tabela 6-5.

Dos valores que tiveram que ser adotados para a realização dos cálculos, os valores do módulo de elasticidade pista – esfera (E) e da relação de Poisson pista-esfera (ν) foram retirados da própria literatura consultada. O coeficiente pressão viscosidade do lubrificante foi retirado de Neale (). O valor da viscosidade do lubrificante foi calculado para a temperatura de trabalho e suas unidades foram transformadas para viscosidade dinâmica (N.s/m²).

Os cálculos foram realizados com um auxílio de uma tabela em Excell e contaram com as seguintes fases:

- Cálculo dos raios equivalentes;
- Cálculo do α_0 para avaliação da natureza do contato Hertziano;
- Cálculo do parâmetro de elipticidade;
- Cálculo das integrais elípticas;
- Cálculo do módulo de elasticidade efetivo;
- Cálculo da máximas compressões elásticas locais;
- Cálculo da esfera mais carregada, utilizando o critério de Stribeck;
- Cálculo da velocidade média na direção do movimento;
- Cálculo do parâmetro adimensional de velocidade;
- Cálculo do parâmetro adimensional de carga;
- Cálculo do parâmetro adimensional de materiais;
- Cálculo do parâmetro adimensional de espessura de filme de lubrificação E-H;
- Cálculo da espessura mínima de filme na junção pista interna-esfera;
- Cálculo da espessura mínima de filme na junção pista externa;
- Cálculo dos parâmetros de lubrificação λ .

Tabela 6-5. Parâmetros para cálculo da espessura do filme de óleo

Símbolo	Componente				Parâmetro	Valor		Fonte		
	Rolamento	Lubrificante	Material	Da experiência		Unidade		Inf. Fabricante	Calculado	Da literatura
d_i	●				Diâmetro Pista Interna	31,062	mm	◆		
d_o	●				Diâmetro Pista Externo	46,938	mm	◆		
d	●				Diâmetro da Esfera	7,9375	mm	◆		
N	●				N.o de esferas	9	-	◆		
R_i	●				Raio Interno do Furo	4,02	mm	◆		
R_o	●				Raio Externo do Furo	4,02	mm	◆		
β	●				Ângulo de Contato	0	°	◆		
Δb	●			●	rms acabam. sup. das esferas	0,032	μm	◆		
Δa	●			●	rms acabam. sup. das pistas	0,08	μm	◆		
E				●	Módulo Elasticidade Pista Esfera	$2,0 \times 10^{11}$	N/m^2			◆
ν		●			Relação de Poisson Pista Esfera	0,3	-			◆
η_0		●			Viscosidade Dinâmica	0,08	N.s/m^2		◆	
ν_0		●			Coefficiente Pressão Viscosidade	$2,43 \times 10^{-8}$	m^2/N			◆
F_r				●	Carga Radial	Variável	N		◆	
β_i				●	Velocidade Angular Pista Interna	Variável	rad/s		◆	
β_o				●	Velocidade Angular Pista Externa	Variável	rad/s		◆	

A partir desses cálculos, chegou-se aos valores teóricos de espessura de filme, mostrados na tabela 6-6.

Tabela 6-6: Valores teóricos calculados de espessura de filme lubrificante para cada condição experimental

Carga Radial (N)	Frequência de Rotação (Hz)	Espessura Conjunção Pista Interna – Esfera hi ($10^{-7}\mu\text{m}$)	Parâmetro de Lubrificação (λ)	Espessura Conjunção Pista Externa- Esfera ho ($10^{-7}\mu\text{m}$)	Parâmetro de Lubrificação (λ)	Avaliação do Regime de Lubrificação
358,81	20	2,9718	3,4	3,5805	4,2	Elasto - Hidrodinâmico
358,81	30	3,9152	4,5	4,7172	5,5	“
358,81	40	4,7611	5,5	5,7364	6,7	“
358,81	50	5,5413	6,4	6,6765	7,7	“
358,81	60	6,2727	7,3	7,5577	8,8	“
841,46	20	2,7951	3,2	3,3676	3,9	“
841,46	30	3,6824	4,3	4,4368	5,1	“
841,46	40	4,4781	5,2	5,3955	6,3	“
841,46	50	5,2119	6,0	6,2795	7,3	“
841,46	60	5,8998	6,8	7,1084	8,3	“
1338,59	20	2,7027	3,1	3,2564	3,8	“
1338,59	30	3,5608	4,1	4,2903	5,0	“
1338,59	40	4,3302	5,0	5,2173	6,1	“
1338,59	50	5,0397	5,8	6,0722	7,0	“
1338,59	60	5,7050	6,6	6,8737	8,0	“

Pela fórmula apresentada no item 4.5, a espessura do filme está vinculada diretamente à velocidade (expoente 0,68) e de forma indiretamente proporcional à carga (expoente de - 0,73). Ou seja, tanto maior será a espessura do filme teórica quanto mais velocidade e menos carga for aplicada. Esta premissa foi totalmente obedecida pelas condições teórico-experimentais estabelecidas, conforme pode ser observado pelos resultados da tabela 6-6.

Outro fato a ser destacado é que os valores calculados utilizando a sequência de cálculos proposta em Hamrock (1984) apresentaram-se bastante adequados, se considerarmos as condições da aplicação experimental.

6.7.3. Procedimentos de aquisição

Uma vez instalada e checada toda a cadeia de medidas, parte-se para a aquisição experimental e para a montagem do banco de dados de cada condição experimental. A seqüência utilizada foi a seguinte:

- Inicia-se o funcionamento da bancada, acionando o variador de frequência, que faz movimentar o eixo de acionamento;
- Checa-se se o sistema de lubrificação do rolamento teste está funcionando adequadamente, com circulação, sem vazamentos e com temperatura do rolamento adequada;
- Verifica-se o funcionamento dos acelerômetros e do sinal de vibração;
- Através do termostato no interior do banho de óleo, faz-se com que a temperatura do banho permaneça constante, variando entre 26 e 28 °C, conforme figura 6-12;



Figura 6-12 Aquecimento do banho de óleo por termostato

- Quando trabalhou-se com o contador de partículas a laser acoplado ao banho de óleo, simultaneamente ao início de aquisição do sinal de vibração, era realizada uma medição do nível de contaminação instantâneo do banho de óleo. Importante registrar que as aquisições *on line* foram realizadas de modo que o equipamento não fosse influenciado pela presença de bolhas no banho de óleo. Isto foi conseguido através da colocação de chicana de plástico no interior da caixa de acrílico. A figura 6-13 ilustra essa operação;



Figura 6-13: Registro de contaminação com contador de partículas

- O certificado de aferição do contador de partículas usado na parte experimental e que foi calibrado segundo a norma ISO 4402, encontra-se no **Anexo 1**
- Aciona-se o programa para aquisitar os dados dos sinais de vibrações do rolamento de teste;
- Os parâmetros de aquisição fixados foram: frequência de amostragem = 21000 Hz e 43000 pontos aquisitados;
- Aquisita-se o sinal no computador com 9 amostras contínuas, anotando-se o nome do arquivo gravado e as respectivas grandezas fixadas nas condições de ensaio (nível de contaminação, temperatura do óleo, carga, velocidade, ganho dos filtros, etc.) .
- Variam-se cargas dos contra pesos e rotações, certificando-se sempre que a temperatura do banho no momento da aquisição permaneça sempre dentro da faixa estabelecida;
- Terminada a seqüência de 15 condições experimentais sucessivas, checa-se no computador se os arquivos foram devidamente registrados, e daí parte-se para uma nova condição experimental;
- Substituição do óleo do rolamento, mudando-se a condição de contaminação. Quando mudou-se apenas a concentração com o mesmo tamanho de sujeira, foi realizada apenas a drenagem completa do óleo da caixa. Quando alteravam-se os tamanhos dos contaminantes, além da drenagem, a caixa de acrílico e a placa de anteparo eram desmontadas, lavadas com solvente, enxugadas e recolocadas no local;

- Importante registrar que entre os intervalos de aquisições, a caixa com o mancal de rolamento permanecia sempre montada no eixo de acionamento. Também nenhum parâmetro da bancada era ajustado ou modificado, no sentido de alterar as condições previamente fixadas no início da série de aquisições;
- Assim, concluída uma seqüência de aquisições, nova montagem era providenciada e uma nova condição experimental realizada, repetindo-se os passos anteriormente descritos.

6.7.4. Abordagens experimentais

A parte prática foi idealizada com duas abordagens distintas e quatro experimentos diferentes. A primeira abordagem foi focada em se conhecer a informação da contaminação, medi-la e observar seu comportamento. A segunda abordagem foi concebida no sentido de comparar condições de óleos isentos e com contaminantes, registrar suas vibrações e aspectos característicos referentes a folga interna do rolamento, rugosidades, características superficiais dos componentes e análise de resíduos de desgaste nos óleos testados.

Com os três primeiros experimentos, utilizando em cada um, um rolamento diferente, e fazendo uso de um contador de partículas automático instalado de modo a registrar o nível de contaminação do óleo no banho, objetivou-se registrar o comportamento do nível de contaminação ISO do óleo, ao mesmo tempo em que registravam-se sinais de vibrações do rolamento.

Foram medidas conjuntamente o nível de contaminação (pelo contador de partículas) e sinais de vibrações para as seguintes condições:

- condição experimental sem contaminação por quartzo, denominada “sq”, constituída por rolamento em banho de óleo isento de contaminantes externos (contaminação natural aleatória);
- condição experimental com contaminantes adicionados, denominadas “3d, 7d e 1d”, constituída por rolamento em banho de óleo com contaminantes de concentração fixa e faixa de tamanhos diferentes;

- condição experimental com contaminantes adicionados, denominadas “1a, 1b,1c, 1d, 1e e 1f”, constituída por rolamento em banho de óleo com contaminantes de faixa de tamanho fixa e concentração variável.

No entanto, vale ressaltar que essas condições experimentais tinham algumas restrições. Os ensaios, aquisições e registros eram realizados de maneira contínua, ou seja, faziam-se cinco aquisições com um carregamento e em seguida, mais cinco aquisições com um segundo carregamento. Ao passo que a cadeia de medidas levava em média quarenta segundos para aquisitar e registrar consecutivamente nove sinais de vibrações do rolamento, o contador de partículas levava cerca de cento e vinte segundos para completar um ciclo de medição da contaminação do óleo. Mesmo sabendo-se que as velocidades de registro e processamento das informações eram diferentes, tentou-se com estas três primeiras sequências, registrar o comportamento geral dessas duas características ao longo das aquisições. Ou seja, o objetivo foi investigar se o processo de contaminação, definido tanto pela quantidade total de contaminantes no óleo, como pela evolução da contaminação por faixas de tamanhos de partículas, poderia influenciar na assinatura do sinal de vibrações do rolamento.

O quarto e último experimento prático teve outro direcionamento. Agora sem a utilização conjunta de um contador automático de partículas, e simplesmente registrando vibrações, a idéia foi investigar eventuais diferenças entre sinais de vibrações de rolamentos em banho de óleo sem contaminantes comparativamente a sinais de rolamento em banho de óleo com contaminação conhecida. Nessa condição também foram investigadas as rugosidades, folgas internas e superfícies das esferas e da pistas antes e depois da contaminação, além dos resíduos de desgaste e de contaminação presentes no óleo lubrificante. O objetivo agora não foi investigar o comportamento do processo de contaminação, mas sim, registrar a assinatura do sinal de um rolamento bom em óleo considerado limpo e, por comparação, pesquisar se essa assinatura era ou não influenciada pela presença de contaminantes sólidos de procedência conhecida. Nesse contexto, fixaram-se duas faixas de tamanho de partículas e realizaram-se aquisições variando as concentrações dos contaminantes, sempre comparando-os com os sinais de vibração registrados de condições sem contaminantes. Ou seja, no quarto experimento o foco foi a comparação de sinais, ou

seja, buscou-se identificar diferenças que pudessem ser correlacionadas com a entrada de contaminantes no banho de óleo do rolamento.

6.8. Processamento de sinais

O processamento das informações aquiritadas teve como base os sinais de vibrações mecânicas no domínio do tempo. Pretende-se comparar os sinais de vibrações das diversas condições experimentais a fim de verificar se existem ou não comportamentos distintos que possam a ser influenciados pelo nível de contaminação do óleo.

As técnicas existentes para a detecção de defeitos em mancais de rolamento podem ser divididas em duas categorias: o método no domínio do tempo e método no domínio da frequência. Exemplos de métodos no domínio do tempo são os valores de nível de picos, RMS, análise do fator de cresta, análise da *kurtosis* e contagem de pulsos de choque.

As diversas técnicas de análises no domínio de frequência foram desenvolvidas para avaliar periodicidades contidas no sinal temporal. São exemplos a análise de espectro, a análise de *cepstrum*, análise de altas frequências de ressonância e a análise de envelope.

Para o processamento dos sinais utilizou-se o software Desenvolveu-se um programa com as seguintes características:

- Carregar automaticamente os sinais de cada aquisição experimental;
- Converter os sinais em unidades de aceleração;
- Centrar os sinais;
- Calcular o RMS de sinal inteiro (RMS SI) da aceleração e o desvio padrão dos RMS entre as diversas amostras para uma dada condição experimental;
- Calcular RMS de altas e baixas frequências (RMS AF e BF) e o desvio padrão dos RMS das diversas amostras de sinais;
- Após todos as variáveis terem sido calculadas e transformadas em bancos de dados, partiu-se para a elaboração de programas que gerassem gráficos dos

resultados calculados. O gráfico de RMS da aceleração X rotação para uma determinada carga radial aplicada foi largamente utilizado;

- Os RMS de AF e BF correspondem ao sinal filtrado passa banda, entre 8,0 e 10,5 kHz e passa baixa, a 8,0 kHz. A razão de separar estas duas bandas é de obter um maior detalhamento da distribuição de energia na composição espectral.

Assim, serão sempre mostrados gráficos do RMS da aceleração de três formas distintas:

- Gráficos do RMS da aceleração aplicados ao sinal inteiro, ou seja, abrangendo a frequência de 0 a 10.500 Hz, que será por praticidade chamado de RMS SI;
- Gráficos do RMS da aceleração aplicados a altas frequências, ou seja, abrangendo a frequência de 8.000 a 10.500 Hz, que será por praticidade chamado de RMS AF;
- Gráficos do RMS da aceleração aplicados a baixas frequências, ou seja, abrangendo a frequência de 0 a 8.000 Hz, que será por praticidade chamado de RMS BF.

Os filtros utilizados nas operações foram os seguintes:

- Filtro tipo IIR Chebyshev, ordem 5, passa baixa com frequência de corte de 1 KHz;
- Filtro tipo IIR Chebyshev, ordem 5, passa alta com frequência de corte de 8 KHz.

As funções do Mat Lab@ utilizadas para essas operações de filtragem são mostradas no Anexo 7.

Da apostila do curso de processamento de sinais aplicado à Engenharia Mecânica preparado por Padovese (2001) se extraiu os seguintes métodos de processamento de sinais.

Variância ou valor quadrático médio do sinal centrado.

$$E_{[\bar{x}^2(t)]} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2$$

onde m é o valor médio do sinal

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

O sinal centrado é:

$$\bar{x}_{(t)} = x_{(t)} - m$$

Esta expressão corresponde a uma filtragem do sinal no domínio da frequência. Ou seja, corresponde a zerar as amplitudes no espectro de frequências na frequência zero e próxima a zero.

Desvio padrão:

$$\sigma = \sqrt{E\{\bar{x}^2(t)\}}$$

RMS ou valor eficaz

$$V_{ef} = \sqrt{E\{x^2(t)\}} = \sqrt{\sigma^2 + m^2}$$

Dentro da abordagem do experimento, o RMS caracteriza a energia do sinal. Toda aparição de anormalidades se traduz por um aumento do nível vibratório da máquina.

6.9. Avaliação das superfícies após ensaios

Como já foi dito anteriormente, para o quarto experimento foram feitos registros da folga interna e da rugosidade dos componentes do rolamento. Faremos citações sobre essas duas medições.

Em NSK (2002), encontra-se que "a folga do rolamento é o jogo entre o anel interno, anel externo e os corpos rolantes. Isto é, fixando qualquer um dos anéis, interno ou externo, a folga é a intensidade de deslocamento do outro anel, quando

movimentado para cima e para baixo, ou para a direita e para a esquerda. (vide figura 6-14). Esta intensidade de deslocamento na direção radial e na direção axial são definidas, respectivamente, como folga radial e folga axial.”

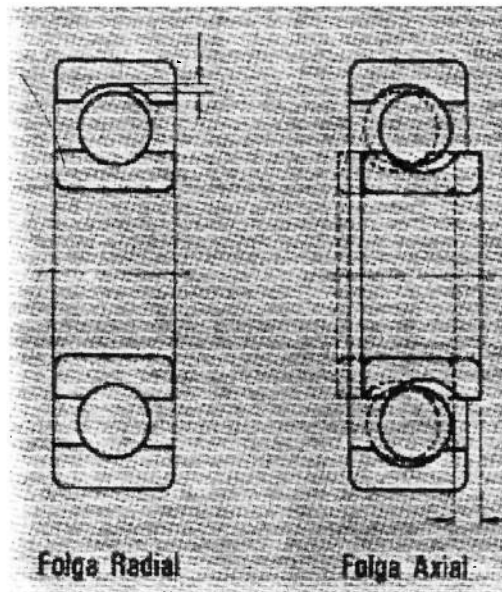


Figura 6-14 Folga interna do rolamento (NSK, 2002)

Sabe-se que os valores de folga interna radial de um rolamento impactam diretamente em sua expectativa de vida. Um rolamento 6208 que em serviço apresentar acréscimo de cerca de 20 μm em seu valor de folga radial, dependendo da carga suportada, poderá ter sua vida nominal diminuída em até 20 %.

Através de consulta a referência citada, em sua tabela 9.9, encontra-se que para rolamentos fixos de esferas com diâmetro de furo entre 24 e 30 mm, a folga interna radial para rolamentos com folga normal deve estar compreendida entre um mínimo de 5 e um máximo de 20 μm . A folga real deve ser obtida corrigindo-se a folga de medição do aumento da folga devido a deformação elástica. O valor de correção da folga para rolamentos com diâmetro nominal do furo entre 18 e 50 mm e folga classe normal, vale segundo NSK (2002), 5 μm .

Stachowiak, Batchelor (2001) colocam que as alturas características das rugosidades são comumente descrita por parâmetros, tais como a linha de centro

média ou idade média (CLA ou simplesmente “ R_a ”, conforme pode ser visto na figura 6-15.. O parâmetro é definido pela fórmula abaixo, sendo L o comprimento da amostra (m) e z a altura do perfil longitudinal ‘ x ’ (m).

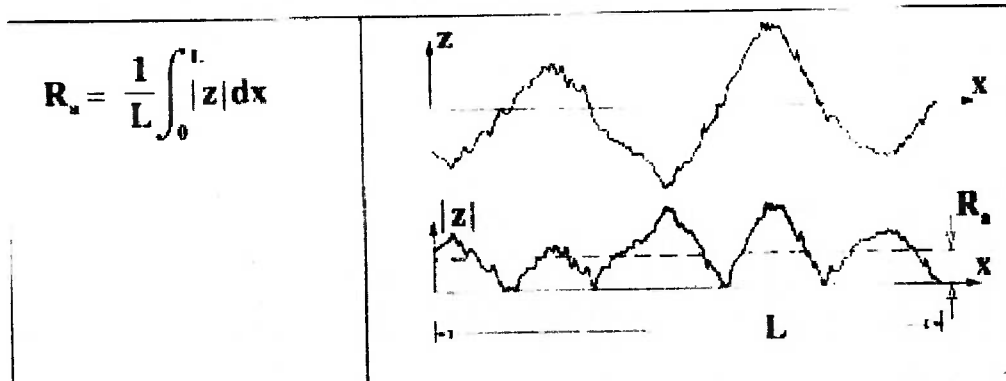


Figura 6-15 Rugosidade média R_a (Stachowiak, Batchelor, 2001)

O fabricante dos rolamentos reportou os seguintes valores de rugosidade para rolamentos fixos de esferas da mesma classe dos utilizados nos experimentos:

- Esferas: $0,032 R_a \mu\text{m}$
- Pistas dos anéis externos: entre $0,08$ a $0,10 R_a \mu\text{m}$
- Pistas dos anéis internos: entre $0,063$ e $0,08 R_a \mu\text{m}$

Jacobson (2000) sugere que a rugosidade das superfícies lubrificadas com lubrificantes contaminados tendem a aumentar e ter sua inclinação variada em função do tamanho, forma, dureza e tenacidade da partícula. A contaminação irá determinar se o dano as superfícies será permanente ou se será possível haver novo contato entre as superfícies quando o lubrificante for limpo.

Assim como já foi citado anteriormente, também Stachowiak, Batchelor (2001), em seus capítulo Lubrificação Elasto-Hidrodinâmica e Desgaste por Fadiga, fazem ponderações sobre o impacto das rugosidades na determinação do parâmetro λ , que é caracterizado pela relação entre a espessura mínima do filme e a rugosidade composta das superfícies.

$$\lambda = h_0 / (\sigma_A^2 + \sigma_B^2)^{0,5}$$

sendo σ_A e σ_B os RMS das rugosidades superficiais dos corpos em contato.

Essa metodologia será utilizada no quarto experimento para se avaliar os impactos dos contaminantes sólidos na rugosidade das superfícies do rolamento.

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

*“Bem mais que o tempo que nós perdemos
ficou pra trás também o que nos juntou
Ainda lembro, que eu estava lendo
Só pra saber o que você achou
dos versos que eu fiz
e ainda espero resposta “....
Resposta – Canta: Skank*

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais, agrupados segundo quatro fases experimentais distintas. Cada uma destas quatro fases é apresentada e detalhada quanto às condições experimentais utilizadas e resultados obtidos. Ao final de cada fase experimental é feita uma discussão comentada dos resultados. As conclusões finais foram registradas no capítulo 8.

7.1. 1.^a Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações realizadas em condição de lubrificante isento de contaminante

Estes resultados referem-se à primeira fase da parte experimental onde os sinais de vibrações foram medidos numa condição de lubrificação em que o óleo foi **preparado** como limpo. Objetivou-se avaliar o comportamento da vibração para um rolamento utilizando um óleo considerado limpo. Investigou-se as influências do carregamento radial e das velocidades de rotação. Ao mesmo tempo que se realizaram as medições de vibrações também utilizou-se um contador de partículas a laser Hydac FCU 2110-4, para monitoramento de possíveis alterações da contaminação do banho lubrificante.

7.1.1. Resultados das medidas do nível ISO de contaminação pelo contador de partículas

A tabela 7-1 registra a variação do grau ISO / NAS de contaminação do óleo em cada uma das quinze condições experimentais registradas. As aquisições foram realizadas na ordem informada pela tabela, ou seja, a primeira condição registrada foi a de rotação do eixo em 20 Hz e carga radial no rolamento de 36,58 kg, e a última condição utilizada foi a de rotação do eixo em 60 Hz e carga radial no rolamento de 136,45 kg.

Nesta tabela registraram-se as seguintes informações:

- na coluna 1, a primeira da esquerda para a direita, a frequência de rotação nominal do eixo, a qual multiplicada por 60, fornece aproximadamente o valor da rotação nominal do rolamento em rpm ;
- na coluna 2, seguindo a mesma ordem, a carga radial total sobre o rolamento, em kg;
- na coluna 3, o número de registro da medição realizada pelo contador de partículas no momento da medição;
- na coluna 4, o grau ISO de contaminação do óleo, segundo a norma ISO 4406, no momento da medição;
- na coluna 5, o equivalente grau NAS de contaminação registrado pelo contador de partículas, segundo a norma NAS 1638;
- nas colunas 6,7,8 e 9, respectivamente, o número de partículas > 2 , > 5 , > 15 e $> 25 \mu\text{m}$ presentes em 100 ml de fluido, foram registradas e contadas pelo contador de partículas, no momento de cada aquisição;
- na coluna 10 a quantidade total de partículas por 100 ml de fluido registrada pelo contador de partículas;
- nas colunas 11 e 12, a rotação real do eixo medida por tacômetro ótico e a temperatura do banho de óleo registrada por termômetro digital naquela condição de aquisição;
- finalmente na coluna 13, registra-se o valor médio do RMS do sinal inteiro, calculado pela média de 9 aquisições consecutivas de sinais.

De posse desta massa de dados, foram avaliadas possíveis correlações entre contaminação e vibrações

Tabela 7-1: Dados de aquisição para óleo sem contaminante

Contaminante: SEM CONTAMINANTE		NIVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO			MEDIÇÕES NA AQUISIÇÃO			RMS SI
Frequência de Rot. Eixo(Hz)	Carga C.Peso (kg)	N.o Registro Contador Part.	Grau ISO	Grau NAS	Quant. Part. Acum/100ml	Rotação (rpm)	Temp. Oleo (oC)	Médias (mm2/s)
20	10,00	233	19/18/14	9	414540	1058	26,00	1,9298
30	10,00	234	20/19/17	10	549756	1644	26,90	2,1706
40	10,00	235	19/17/14	9	290332	2186	26,50	2,3688
50	10,00	236	18/17/13	9	237756	2700	26,70	3,1338
60	10,00	237	18/17/13	8	210996	3089	26,20	3,7826
20	30,00	242	19/17/13	9	264924	1057	26,40	1,9565
30	30,00	243	18/17/13	8	243692	1615	26,20	2,3823
40	30,00	244	18/17/13	8	233068	2143	27,40	2,5918
50	30,00	245	18/16/13	8	224564	2655	26,20	2,6014
60	30,00	246	18/16/12	8	182572	2914	28,00	3,4718
20	50,60	247	18/16/13	8	172548	943	26,10	2,0025
30	50,60	248	18/16/13	8	189180	1510	27,60	2,3168
40	50,60	249	18/16/13	8	170748	2032	26,00	2,5968
50	50,60	250	18/16/13	8	156372	2502	27,30	2,9135
60	50,60	251	18/15/12	7	131956	2776	26,20	3,2600

Analisando os resultados apresentados na tabela 7-1, percebe-se que o óleo preparado como limpo sofreu uma alteração do seu nível de contaminação ao longo do experimento, registrado pelo contador de partículas. Vamos analisar a seguir em detalhes a evolução desta contaminação expúria.

Percebe-se num primeiro momento, que os maiores níveis de contaminação no óleo foram registrados para a carga de 36,58 kg, em todas as velocidades. No entanto, os maiores valores de RMS das velocidades de 20, 30 e 40 Hz ocorrem para condições que não equivalem as de maior contaminação no óleo. Pela tabela 7-1, não se evidenciou uma correlação entre contaminação e RMS, para uma mesma velocidade. Este fato será melhor discutido no item 7.1.3.

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se nos **Anexos 5 e 6**.

O gráfico da figura 7-1 refere-se aos valores das colunas 6,7,8, 9, 10 e 13 da tabela 7-1, relativa a evolução da contaminação do óleo por faixa e por número total de partículas, da condição experimental denominada sem contaminante quartzo ou simplesmente "sq".

Registra-se aqui que a notação ISO R2, registrada pelo contador de partículas, identifica o comportamento das partículas maiores do que 2 μm ao longo dos ensaios. O mesmo se aplica para as partículas maiores do que 5, 15 e 25 μm (R5, R15, R25), como também para a quantidade total de partículas medidas. Na ordenada desses gráficos serão sempre registrados a quantidade de partículas / 100 ml de fluido

medidas pelo contador. Nas abcissas serão registradas a frequência de rotação e a carga radial aplicadas no momento de cada aquisição.

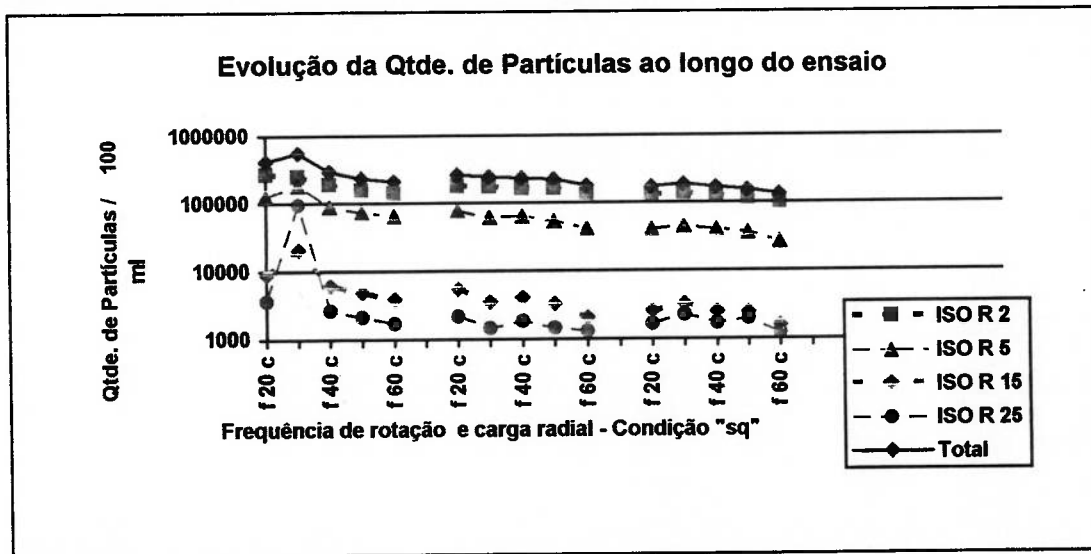


Figura 7-1: Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X Condição Experimental "sq"

Percebe-se que a tendência geral do comportamento de todas as faixas de tamanho de partículas e da quantidade total, é a de diminuir sua quantidade ao longo da seqüência das experiências.

7.1.2. Resultados do RMS da aceleração

Os gráficos das figuras 7-2, 7-3 e 7-4 mostram de que forma evoluíram o RMS da aceleração para cada uma das três cargas radiais aplicadas, utilizando para o cálculo do RMS a banda total em frequência, a banda alta e a baixa respectivamente (de acordo com o item .6.8).

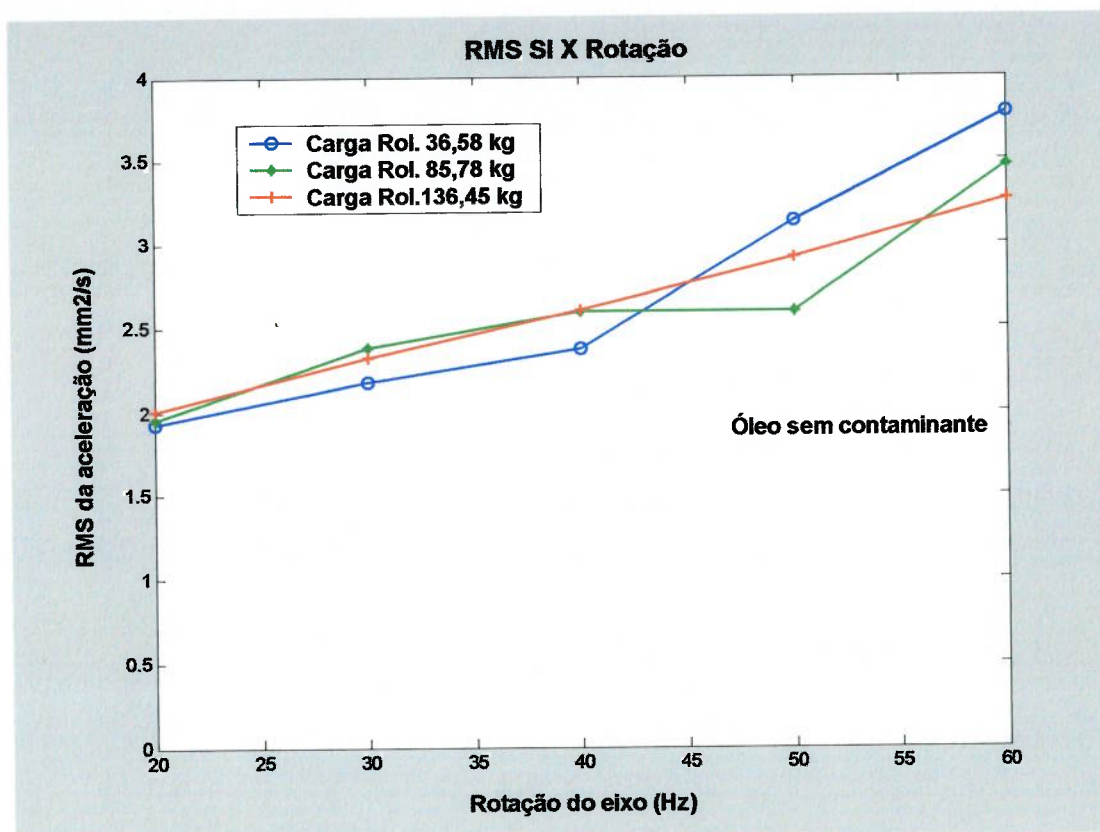


Figura 7-2: Gráfico de RMS SI X rotação do eixo – 3 cargas

Analisando a figura 7-2, percebe-se inicialmente que os valores do RMS SI são bastante influenciados pela rotação do rolamento, ou seja, em todas as cargas aplicadas, os valores de RMS SI evoluem predominantemente influenciados pela rotação de trabalho. A influência da carga é variável conforme a rotação.

Apenas para efeito comparativo com os outros gráficos de RMS, registramos o comportamento dos valores de RMS SI em 60 Hz. Nota-se que maior valor de RMS SI foi registrado para a menor carga aplicada e o menor valor de RMS SI para a maior carga aplicada.

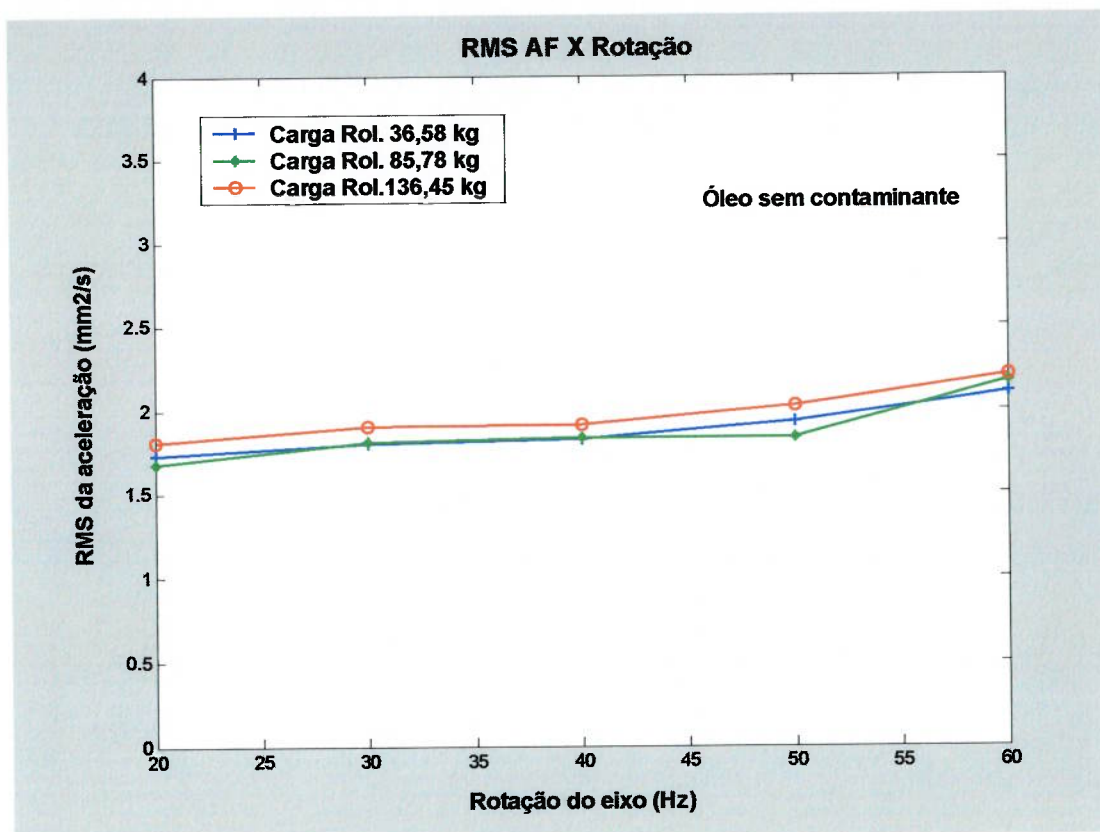


Figura 7-3: Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – 3 cargas

O gráfico da figura 7-3 refere-se ao cálculos dos valores de RMS AF em função da rotação. Percebe-se um comportamento bastante distinto do primeiro, ou seja, os valores de RMS são pouco influenciados pelo aumento da frequência de rotação, além do que também pouco variam com as cargas aplicadas no rolamento. Os valores de RMS também são menores que os mostrados no primeiro gráfico. Na frequência de 60 Hz especificamente, apesar de com pouca diferença entre os valores, o maior valor de RMS AF corresponde ao da maior carga aplicada e o menor valor de RMS AF corresponde ao de menor carga aplicada, uma ordenação diferente daquela observada no cálculo do RMS SI.

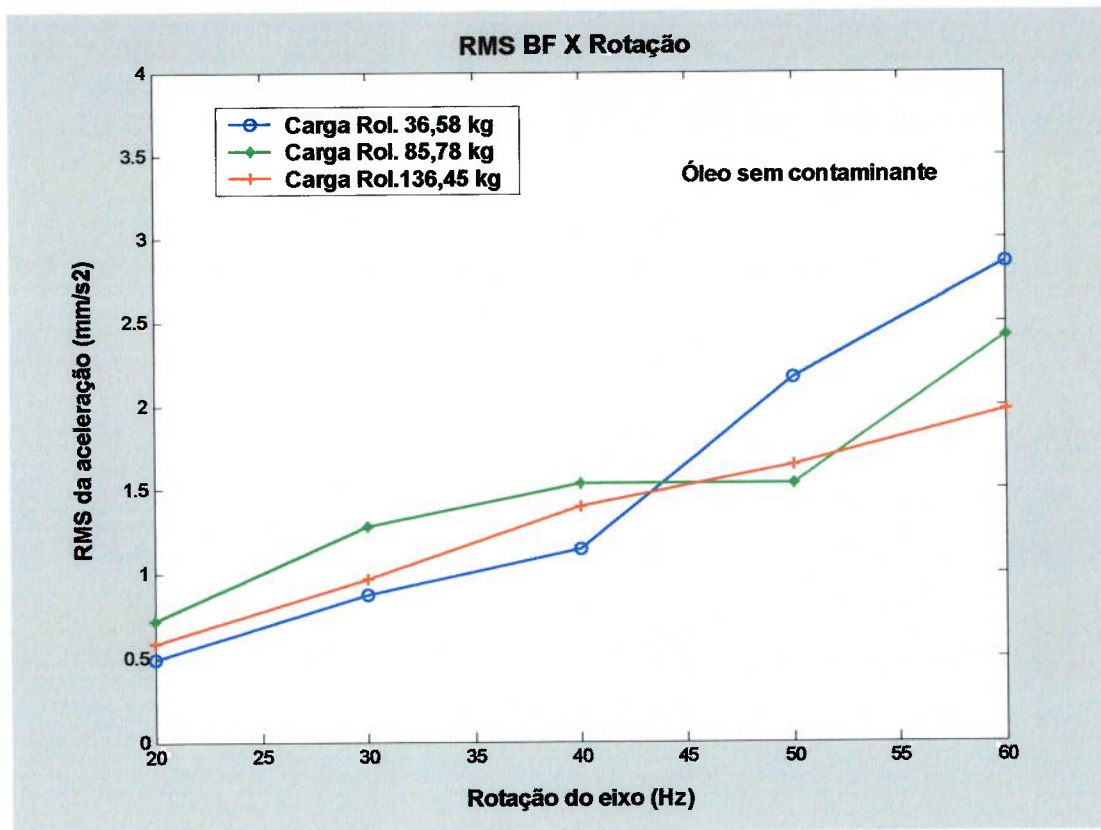


Figura 7-4: Gráfico de RMS BF X rotação do eixo – 3 cargas

Por último, apresentamos o gráfico 7-4 do RMS BF, que corresponde ao sinal filtrado em baixas frequências. Percebe-se agora um comportamento bastante parecido com o do SI, mas com valores menores. É notada grande dispersão entre os valores do RMS, ou seja, ocorre uma mudança de posição entre os valores de RMS para as três cargas a cada rotação medida. A tendência geral é de aumento do RMS conforme se dá o aumento da rotação, porém nada se pode afirmar sobre o comportamento do RMS em relação às cargas aplicadas. A dispersão entre os valores máximos e mínimos também é muito grande. Especificamente em 60 Hz de velocidade, o comportamento segue o mesmo daquele observado quando foi calculado o RMS SI.

7.1.3. Correlação de resultados entre nível ISO de contaminação e vibração

A figura 7-5 representa o gráfico onde estão correlacionados os valores de contaminação ISO do óleo, em cada carga e frequência de rotação, e os respectivos valores de RMS SI. Analisando o gráfico é possível constatar que:

- O nível de contaminação ISO diminui ao longo da seqüência dos experimentos, para todas as cargas e frequências de rotação aplicadas;
- Os valores do RMS da aceleração se elevam de acordo com o aumento das cargas e das frequências de rotação;
- O gráfico sugere um aumento do valor do RMS com a diminuição da quantidade de partículas registrada pelo nível ISO. Mas, conforme será discutido em detalhes no próximo item, esta correlação pode ser apenas coincidência.

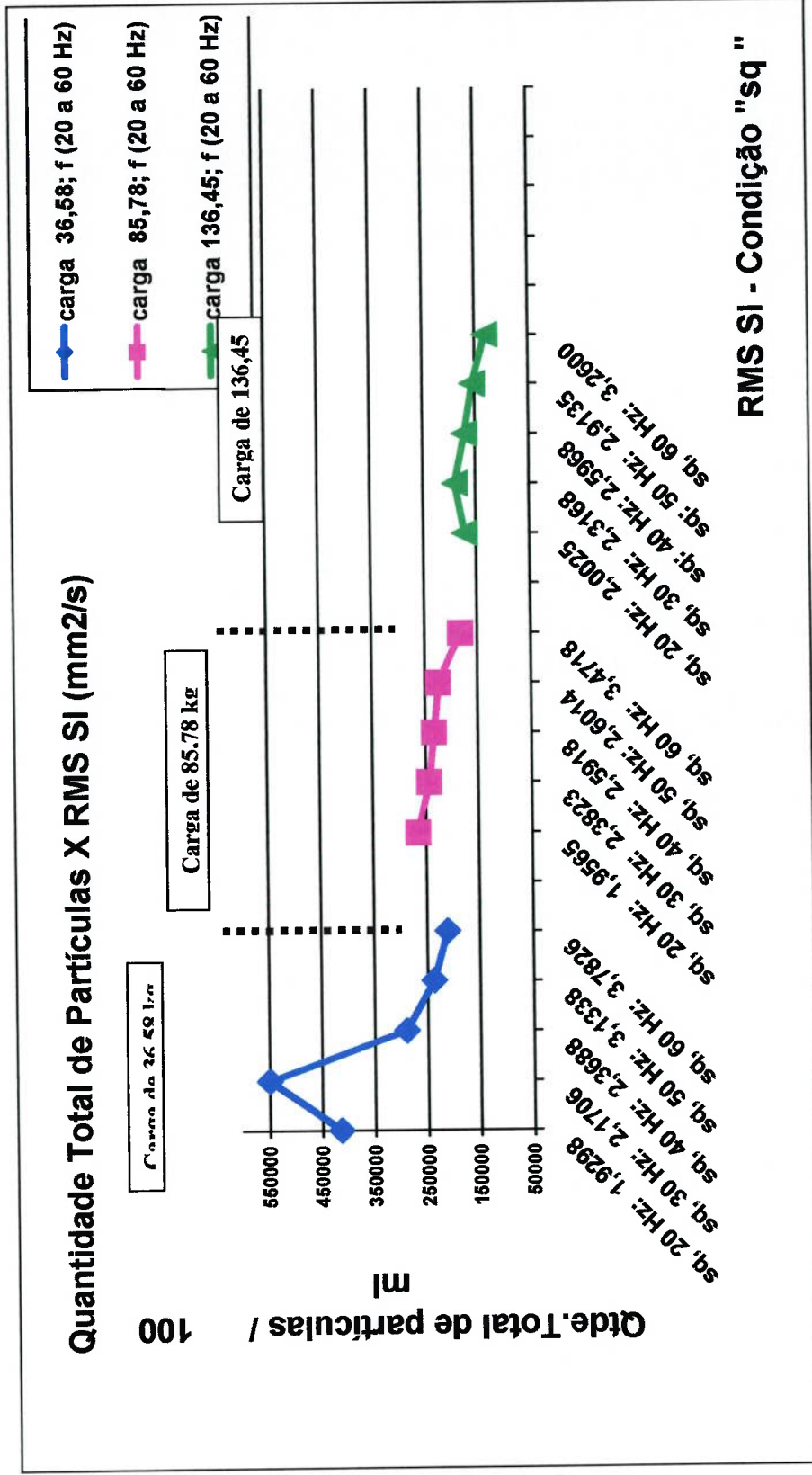


Figura 7-5: Gráfico comparativo entre contaminação e vibração: Condição "sq"

7.1.4. Discussão dos resultados

Um dos objetivos desta primeira fase experimental foi avaliar como se comportou o nível de contaminação e a vibração do rolamento nas diferentes condições de carga e velocidade, além de avaliar os impactos e correlações entre nível de contaminação ISO de óleos de rolamento levemente contaminados com o valor do RMS da aceleração.

O ensaio de contagem de partículas registrou uma elevação inicial muito grande em relação ao nível de contaminação do óleo antes da adição do lubrificante na cuba de teste, conforme registrado no item 7.1.1. Passou-se do nível de contaminação ISO 15/13/10 (vide Anexo 8, registros 215 e 216) registrado em relação ao óleo contido na bombona de óleo sem uso e filtrado, para um nível de contaminação ISO 19/18/14 registrado na primeira aquisição, **cerca de oito a dez vezes mais sujo que o valor inicial**. Isto pode ser explicado pelas condições da cuba de teste, que não era perfeitamente vedada e permitia a entrada de contaminantes externos oriundos do ambiente onde se realizava o ensaio. Aparentemente também a limpeza realizada na cuba não permitiu uma descontaminação (anterior ao ensaio) que fosse compatível com a sensibilidade do contador.

Uma vez iniciados os registros com o contador de partículas, observou-se uma ligeira redução no nível de contaminação do óleo. Isto em parte pode ser explicado pelo fato do contador de partículas possuir internamente um filtro absoluto de segurança, com fator Beta $5 \geq 200$, considerado bastante eficiente para a aplicação. Essa característica fez com que, a cada medição, cerca de 10 % do volume se purificasse automaticamente, diminuindo a quantidade de contaminantes no sistema. A tendência lógica era que a quantidade de contaminantes sofresse alguma diminuição ao longo da continuidade das experiências. Esta alteração realizada na condição de contaminação pelo próprio mecanismo interno de segurança do contador, pode ser considerada desprezível, face aos valores de contaminação natural obtidos.

Registra-se uma única exceção durante os ensaios que foi o aumento da quantidade de partículas verificado nos dois primeiros registros, com a carga de 36,58 kg, e quando a frequência foi variada de 20 para 30 Hz, fato que pode ser

explicado como um caso isolado de imprecisão do equipamento. Nos demais registros, é clara a tendência de diminuição da quantidade de contaminação.

O comportamento das vibrações quanto a variação da rotação e carregamento foi analisado no item 7.1.2. Constatou-se que valores de RMS crescem conforme a carga e rotação são aumentadas. A relação aumento de frequência de rotação com aumento de RMS se deu nos três carregamentos.

Tendo em vista que a diminuição do nível ISO e o aumento do valor do RMS aparentemente se devem a fenômenos independentes entre si, o aumento do RMS com diminuição do valor ISO, sugerido no gráfico 7-5, **não representa uma correlação real entre estes dois parâmetros.**

7.2. 2ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações utilizando óleos com contaminação controlada: tamanho de partícula variável e concentração constante

Nesta segunda fase de testes, repetiu-se a mesma metodologia anterior, que foi a de aquistar sinais de vibrações em conjunto com registros de informações do nível de contaminação do lubrificante. A diferença é que desta vez contaminantes de procedência conhecida foram inseridos nos volumes de óleo. O objetivo portanto foi avaliar se esses contaminantes adicionados, com tamanhos distintos e mesma concentração, acarretaram impactos aos sinais de vibração do rolamento.

Três volumes de óleo contendo em cada um tamanhos diferentes de partículas, foram preparadas mantendo a concentração de 1 g/l. constante. Três faixas de tamanho de contaminante foram utilizadas (conforme Tabela 6-3.):

- 38 a 32 μm , discriminada como condição experimental "3d";
- 75 a 53 μm , discriminada como condição experimental "7d";
- 105 a 75 μm , discriminada como condição experimental "1d".

Da mesma forma que na condição anterior, os resultados do comportamento da contaminação foram dispostos em planilhas e em seguida em gráficos, serão mostrados as tabelas de registros e aquisições e os gráficos de evolução da contagem de partículas para cada uma das três condições de contaminação. Na seqüência, os resultados do RMS da aceleração das três condições de contaminação serão

mostrados simultaneamente para efeito de comparação, buscando evidenciar eventuais impactos da contaminação na assinatura dos sinais de vibrações.

7.2.1. Resultados das medidas do nível de contaminação pelo contador de partículas

A tabela 7-2. mantém o padrão de formatação mostrado da tabela 7-1, com a mesma ordem de registros e com o cálculo do valor média do RMS da aceleração do sinal inteiro. Os resultados referem-se a condição experimental denominada “3d”.

Tabela 7-2 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “3d”

Quartzo 38 a 32 µm - 1g/l		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 3d							MEDIÇÕES NA AQUISIÇÃO		RMS SI	
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Rotação (rpm)	Temp. Óleo (°C)	Médias (mm2/s)
20	36,58	268	24/22/18	14	5767167	2424831	156671	67583	8416252	1183	27,90	0,4845
40	36,58	267	24/22/18	14	5701631	2623135	173055	71679	8489600	2373	26,30	0,7919
60	36,58	268	23/22/18	13	4620287	1884159	137215	59135	6700796	3660	26,00	1,1325
20	86,78	269	23/21/18	13	5111807	1662975	98303	34559	6907644	1156	26,10	0,4444
60	86,78	270	23/21/17	13	4882431	1343487	78335	27903	6332156	3510	26,00	0,9728
20	136,45	271	23/20/16	12	4423679	802815	32383	11967	5270844	1156	26,00	0,4818
40	136,45	272	23/20/16	12	4227071	733183	27519	9655	4997628	2341	26,90	0,7562
60	136,45	273	23/20/15	12	3768319	618495	22783	9023	4418620	3539	26,70	1,0069

Um valor significativamente menor de RMS SI é observado nesta condição, comparativamente aos valores registrados na primeira fase experimental, fato que será melhor discutido no item 7.2.3.

Nesta condição experimental, se compararmos as três cargas aplicadas e cinco velocidades de rotação, veremos que aos maiores valores registrados de contaminação no óleo, representados pelas rotações de 20, 40 e 60 Hz com carga de 36,58 kg, corresponderam os maiores valores de RMS do sinal inteiro.

Cabe uma explicação em relação ao registro de grau NAS 14 realizado pelo contador automático de partículas. Apesar do maior valor de grau de contaminação citado na norma NAS 1638 ser o grau 12, a empresa Hydac fabricante do contador utilizado, optou por reportar valores de nível de contaminação extrapolados ao dos inicialmente previstos pela norma NAS 1638. Na verdade, se compararmos as normas ISO e NAS, percebe-se que a norma ISO admite uma maior quantidade total de contaminantes por mililitro de óleo. Foi essa a lógica utilizada pelo fabricante do contador, ou seja, correlacionar os graus ISO com NAS em todas as classes da classificação ISO.

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexos 8 e 9.

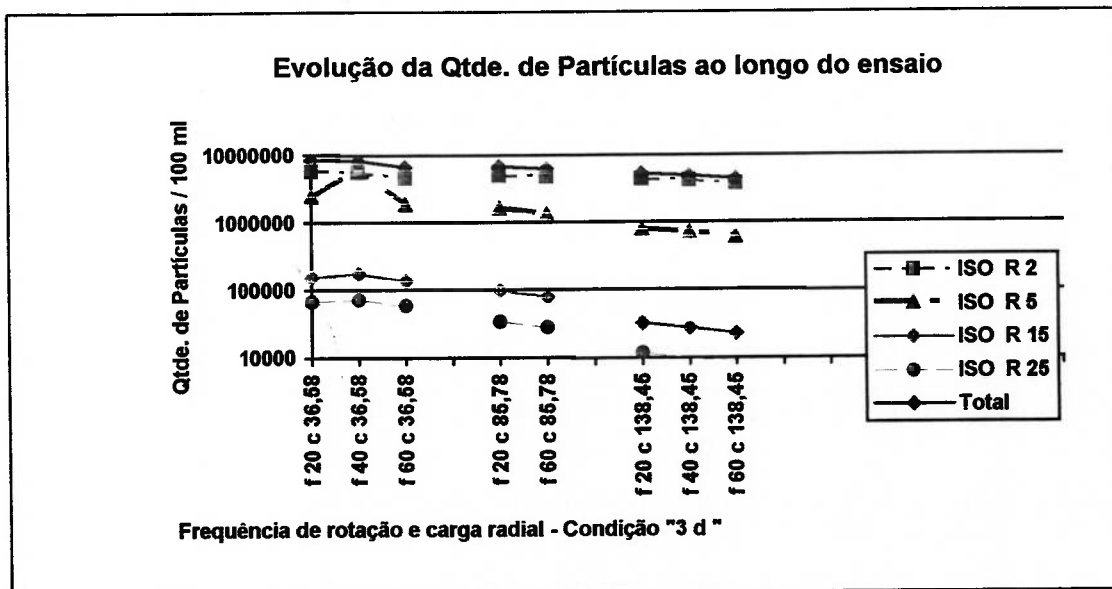


Figura 7-6: Gráfico de qtde.de partículas por faixa de tamanho X Condição Experimental “3d”

A figura 7-6 apresenta de forma gráfica alguns dados da tabela 7-2. Da mesma forma que na primeira fase experimental, realizada com o óleo lubrificante isento de contaminantes, percebe-se uma diminuição gradual do nível de contaminação ao longo da seqüência da experiência.

Os próximos resultados mostrados na tabela 7-3, referem-se à condição experimental “7d”.

A tabela 7-3 registra os valores na mesma ordem das tabelas anteriores. Apenas a coluna 11, destinada à rotação real medida por tacômetro, foi retirada por não adicionar informação relevante.

Tabela 7-3. Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “7d”

Quartzo 75 a 53 µm - 1g/l		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 7d								MEDIÇÕES		RMS SI
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Oleo (oC)	Médias (mm2/s)	
20	36,58	274	23/21/19	13	2736127	901119	242687	186367	4066300	26,80	0,5002	
60	36,58	276	24/23/19	15	7897087	6225919	211967	69631	14404604	27,40	1,2949	
20	85,78	277	24/23/19	15	7536639	4292607	226303	104959	12160508	26,10	0,5223	
60	85,78	278	24/22/18	13	8290303	3653631	121343	39935	12105212	28,00	1,2794	
20	136,45	279	24/22/18	14	8365839	2932735	98303	41471	11428348	27,90	0,5490	
60	136,45	280	24/22/17	14	7995391	2277375	74751	27519	10375036	27,60	1,3899	

Grande diminuição no valor do RMS pôde ser observada, em relação a primeira fase de experimentos (sem contaminante).

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexo 9.

Evolução da Qtde. de Partículas ao longo do ensaio

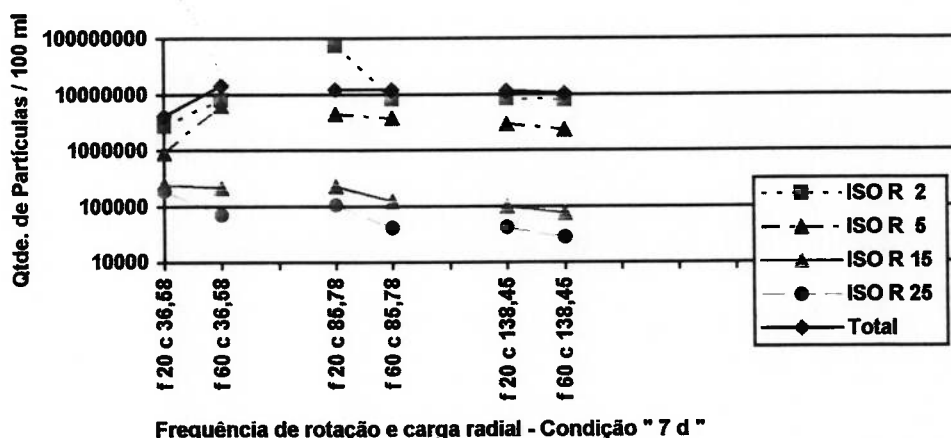


Figura 7-7: Gráfico de qtde.de partículas por faixa de tamanho X Condição Experimental “7d”

A figura 7-7 apresenta um gráfico de alguns dados da tabela 7-3. Percebe-se que os registros das primeiras medidas sugerem haver uma tendência no aumento da quantidade de alguns tamanhos de partículas no banho. No entanto, de um modo geral, percebe-se uma diminuição da quantidade total de partículas no banho ao longo da seqüência das medições

Por fim, a tabela 7-4 traz o registro dos resultados da condição “1 d”.

Tabela 7-4. Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1d”

Quartzo 105 a 75 µm - 1g/l		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1d								MEDIÇÕES		RMS SI
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Óleo (oC)	Médias (mm2/s)	
20	36,58	314	21/20/18	11	987135	475135	39679	133119	1635068	28,00	0,7279	
60	36,58	315	21/19/16	11	1064959	411647	22143	10943	1509692	26,00	1,7018	
20	85,78	316	21/19/15	11	1138697	374783	19711	8255	1541436	26,40	0,7114	
60	85,78	317	21/19/15	11	1003519	305151	16511	7007	1332188	26,10	1,5998	
20	136,45	318	22/20/16	11	1687551	475135	27135	13695	2203516	26,60	0,6557	
60	136,45	319	22/20/16	12	2436644	633405	51774	15423	2436644	26,10	1,5070	

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexos 9 e 10

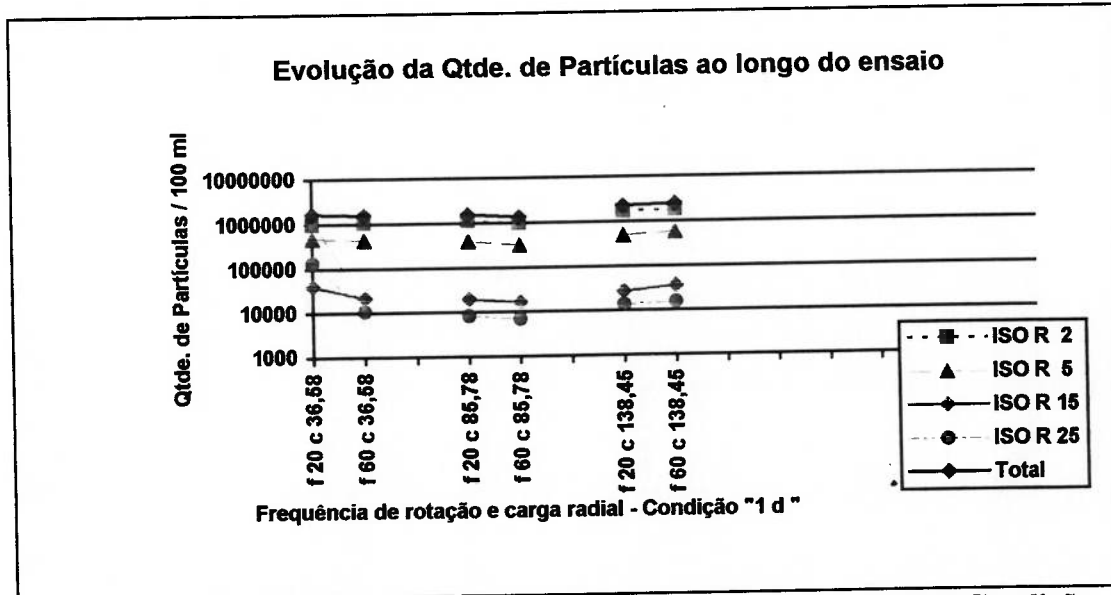


Figura 7-8: Gráfico de qtde.de partículas por faixa de tamanho X Condição Experimental "1d"

A figura 7-8 apresenta um gráfico de alguns dados da tabela 7-4. Desta vez, percebe-se um comportamento um pouco diferente dos resultados anteriores, mostrados nas figuras 7-6 e 7-7. Possivelmente devido ao maior tamanho do contaminante adicionado, percebe-se inicialmente uma diminuição de partículas, sugerindo ocorrência de decantação. Em seguida as partículas mantêm sua quantidade no banho. Por último, na condição referente a carga de 136,45 kg, percebe-se uma tendência ao aumento da quantidade de partículas em todas as faixas. É possível que quando essa carga foi aplicada, partículas de quartzo tenham sido trituradas e quebradas em outras de tamanho menor, repercutindo num aumento total da quantidade de partículas na última condição experimental.

7.2.2. Resultados do RMS da aceleração

Até o momento foram mostrados detalhes do comportamento do ensaio de contagem de partículas ao longo das aquisições. Agora, iremos mostrar graficamente de que forma evoluiu o parâmetro RMS da aceleração em cada fase da condição experimental e em seguida, discutir correlações com os valores de contaminação.

Os gráficos da figura 7-9 referem-se ao comportamento do RMS da aceleração em cada uma das quinze condições experimentais realizadas. Os valores médios de RMS da aceleração do sinal inteiro foram calculados e mostrados para cada um dos três carregamentos e para as cinco rotações testadas. Também foram simultaneamente mostrados como variaram os valores de RMS para os três tipos de tamanho de contaminantes utilizados, referentes às condições “3d”, “7d” e “1d”.

Os gráficos da figura 7-9, assim como os demais que serão apresentados, mostram os valores médios do RMS de nove sinais, com barras de erro indicando um valor equivalente a três vezes o desvio padrão. Na legenda dos gráficos, “dp” refere-se a três vezes o valor de desvio padrão, que na Distribuição “T Student”, equivale a uma confiabilidade de cerca de 98 %.

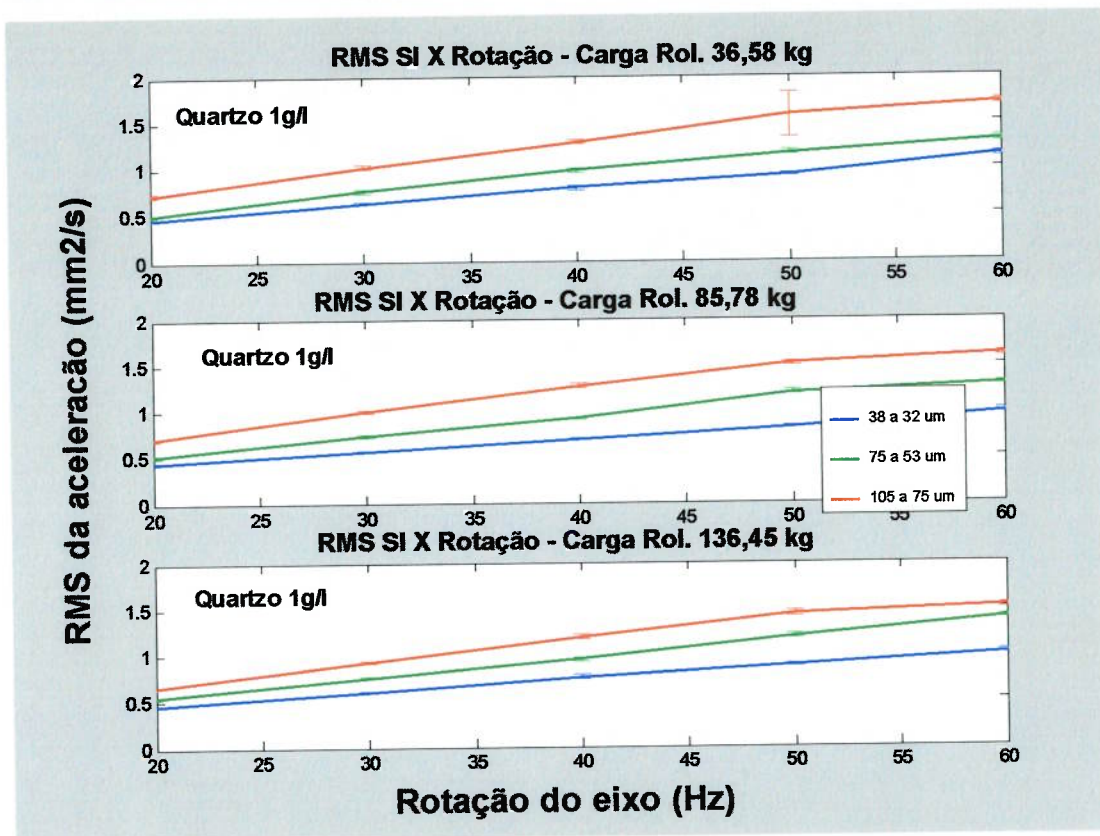


Figura 7-9 Gráficos de RMS SI X rotação do eixo - 3 cargas

Assim como foi observado na primeira fase de testes, percebe-se a forte influência da rotação no valor do RMS, ou seja, este parâmetro aumenta com influência direta da rotação, independente da carga radial aplicada e do tamanho do contaminante presente no banho de óleo. Comprova-se desta maneira a forte

influência das condições dinâmicas do rolamento, determinadas no caso pela rotação de operação, no valor do RMS SI.

A principal observação a se destacar é a evolução dos valores do RMS com o tamanho do contaminante. Percebe-se que para as três condições de carga testadas, o maior valor de contaminante apresentou proporcionalmente o maior valor de RMS, e as condições com o contaminante de menor tamanho apresentaram menores valores de RMS, isto para todas as cargas e rotações. Estes resultados sugerem uma correlação direta entre RMS de vibração e tamanho de partícula de contaminante.

Esses resultados são compatíveis com os obtidos por Komiya (1992), referência citada no item 5.3, que realizou experimento com mistura de graxas e óleos, onde também foram registrados relações diretas entre o aumento do tamanho de contaminantes e o respectivo aumento no valor das vibrações.

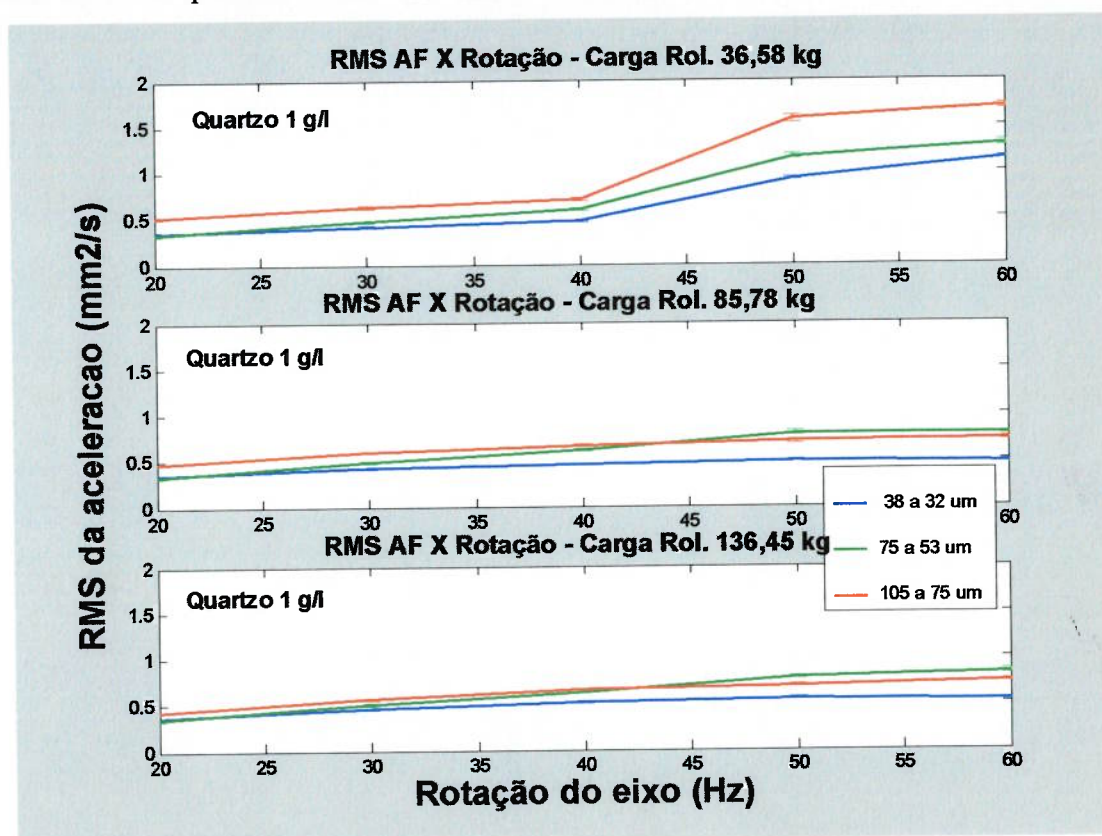


Figura 7-10. Gráficos de RMS AF X rotação do eixo - 3 cargas

O gráfico do RMS AF, mostrado na figura 7-10., apresenta um comportamento parecido com o gráfico de RMS SI apenas para a carga de 36,58 kg. Para as outras duas condições de carga aplicada observam-se diferentes variações nos

valores de RMS AF. Nessas duas outras cargas, os valores em si pouco variam e são bastante inferiores aos observados no gráfico do RMS SI. Enquanto que o valor máximo do gráfico SI atingiu $1,5 \text{ mm}^2/\text{s}$, para o RMS AF esse valor foi de cerca de $0,8 \text{ mm}^2/\text{s}$. Em 20, 30 e 40 Hz a ordem dos maiores valores de RMS acompanha os maiores valores de contaminantes. Para as frequências de 50 e 60 Hz observa-se uma inversão: as partículas de 75 a 53 μm apresentam maiores valores de RMS AF, seguidas das de 105 a 75 μm , ficando o menor valor para as partículas na faixa de 38 a 32 μm .

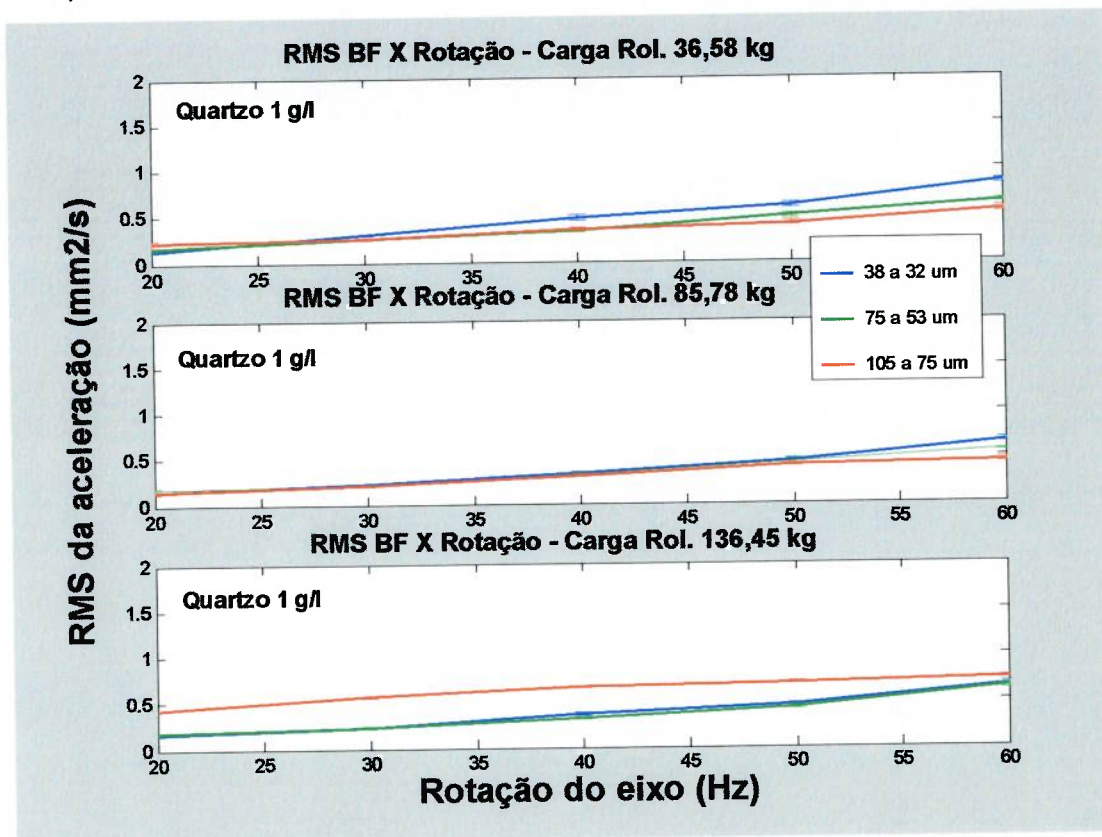


Figura 7-11 Gráficos de RMS BF X rotação do eixo - 3 cargas

O comportamento do gráfico de RMS BF, mostrado na figura 7-11 é diferenciado dos demais. Para as cargas de 36,58 kg e 85,78 kg e frequências de 20, 30 e 40 Hz é difícil identificar uma diferença significativa entre os valores. Já em 50 e 60 Hz, a ordem observada é a de maior valor para o RMS com o menor tamanho de contaminante.

Já no caso da carga de 136,45 kg, o comportamento observado lembra o do sinal inteiro. Os tamanhos de 75 a 53 μm e os de 105 a 75 μm quase não apresentam distinção entre si.

7.2.3. Correlação entre nível ISO de contaminação e vibração

Também para esta fase experimental, foi preparado um gráfico mostrando a evolução do nível ISO (quantidade de partículas) com a vibração.

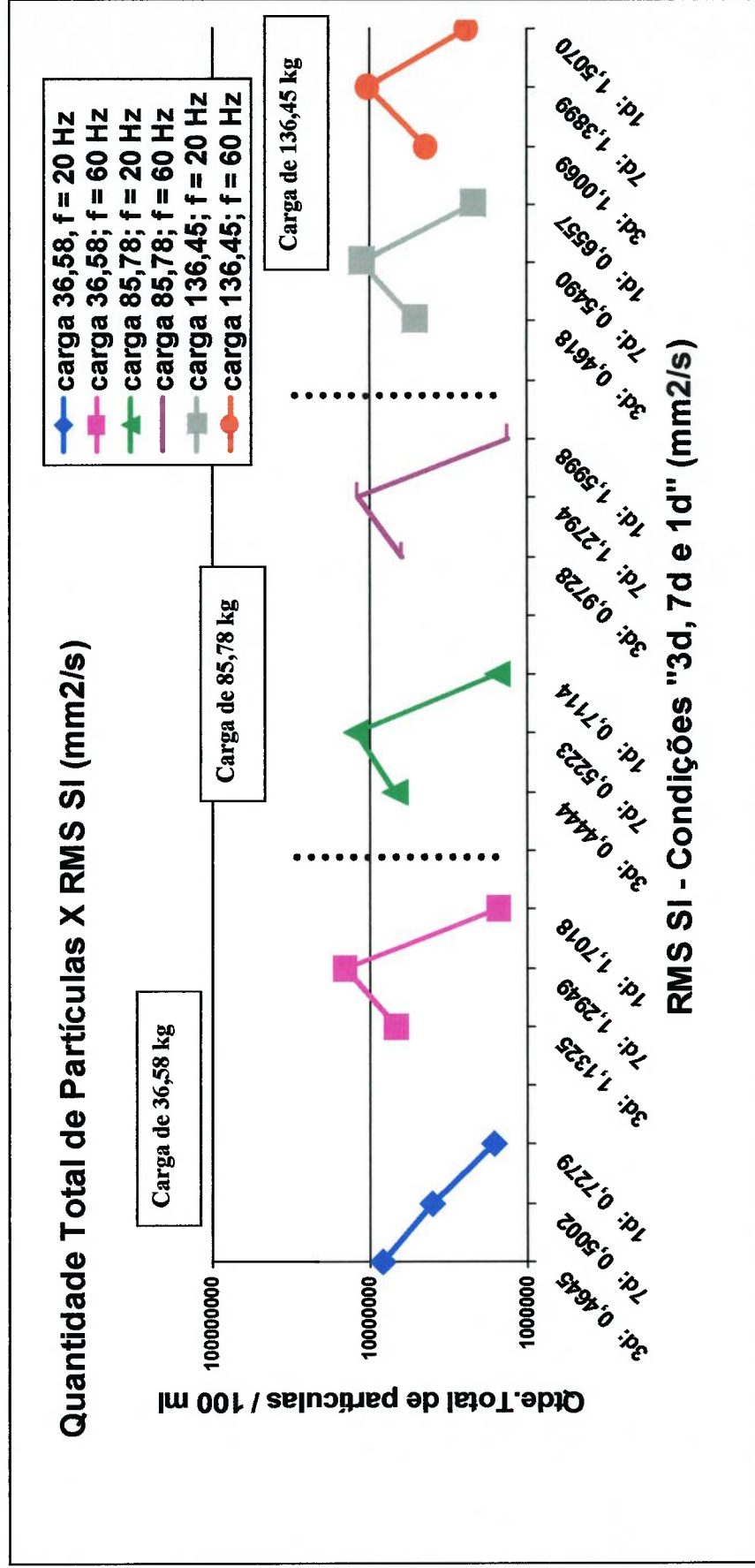


Figura 7-12: Gráfico comparativo entre contaminação e vibração: Condições "3d, 7d e 1d"

O gráfico da figura 7-12 representa a relação entre os valores de contaminação ISO registrados pelo contador de partículas e os valores de RMS SI para cada carga e velocidade de rotação das três condições de contaminação.

Analisando-se o gráfico da figura 7-12 percebe-se que para a primeira condição de trabalho do rolamento (carga de 36,58 kg e velocidade de rotação de 20 Hz), a quantidade total de partículas no banho diminui ao passo em que as medições vão se realizando. A partir da segunda frequência de registro (60 Hz) e para todas as outras condições combinadas de carga e velocidade, o comportamento se repete. Parte-se de um determinado nível ISO, referente a condição de 38 a 32 μm , essa quantidade total de partículas eleva-se quando é adicionado ao banho contaminantes entre 75 e 53 μm , e finalmente a quantidade total de partículas cai quando contaminantes com tamanho médio entre 105 e 75 μm são colocados no experimento. Supõe-se de forma hipotética que dois fenômenos distintos podem ter ocorrido. O aumento do nível ISO para tamanho de partícula “7d” pode ter ocorrido por trituração na zona de carregamento do rolamento. O mesmo pode ter ocorrido para o tamanho “1d”, mas aparentemente um importante processo de decantação pode ter acontecido. Estas hipóteses não foram avaliadas experimentalmente.

7.2.4. Discussão dos resultados

Para uma melhor discussão dos resultados foi elaborado inicialmente uma tabela que resumirá como se deu o comportamento da contaminação em cada uma das etapas do ensaio.

A tabela 7-5 resume o comportamento dos ensaios através da medição da quantidade de partículas pelo contador desde o primeiro até o último registro do nível de contaminação

Tabela 7-5 Comportamento das partículas ao longo dos registros

Condição Experimental	Partículas > 2 μm	Partículas > 5 μm	Partículas > 15 μm	Partículas > 25 μm	Qtde. Total de Partículas
3d	36,58 kg	▼	▼	▼	▼
	85,78 kg	▼	▼	▼	▼
	136,45 kg	▼	▼	▼	▼
7d	36,58 kg	▲	▲	▼	▲
	85,78 kg	▲	▼	▼	▼
	136,45 kg	▼	▼	▼	▼
1d	36,58 kg	▲	▼	▼	▼
	85,78 kg	▼	▼	▼	▼
	136,45 kg	▲	▲	▲	▲

- A notação ▼ significa que naquela condição de carga, a quantidade de partículas daquela faixa diminuiu ao longo dos registros de contaminação;
- A notação ▲ significa que naquela condição de carga, a quantidade de partículas daquela faixa aumentou ao longo dos registros de contaminação;
- A notação ▲▼ significa que naquela condição de carga, a quantidade de partículas daquela faixa permaneceu constante ao longo dos registros de contaminação.

Percebe-se pela tabela um comportamento diferenciado em cada faixa de tamanho de partículas. Para as condições experimentais “3d”, “7d” e “1d”, para todas as cargas aplicadas, a tendência geral é a de diminuição da quantidade de partículas.

No entanto, há que se entender que essa diminuição deve ser considerada irrisória perto dos índices registrados. Assim, mesmo sob efeito da filtragem realizada pelo filtro interno do equipamento, os níveis de contaminação medidos foram considerados muito elevados se comparados as normas existentes. É possível admitir que nessas condições tenha havido mais **decantação** do que propriamente contaminantes em suspensão. E contaminantes decantados efetivamente não foram contados pelo contador de partículas.

Apenas para a última aplicação de carga de carregamento da condição “1d” (136,45 kg), observou-se uma tendência geral do aumento do nível ISO de

contaminação, conforme tabela 7-5 e figura 7-8. Talvez uma situação de trituração de partículas em função das cargas aplicadas possa ter ocorrido.

As partículas que não se decantaram teriam contribuído para a ocorrência de alguns fenômenos, que a seguir serão discutidos.

Sabe-se que a informação de vibração é oriunda do contato pista-esferas nas zonas carregadas e descarregadas. Observe a figura 7-11., que ilustra detalhes da zona descarregada do rolamento testado.

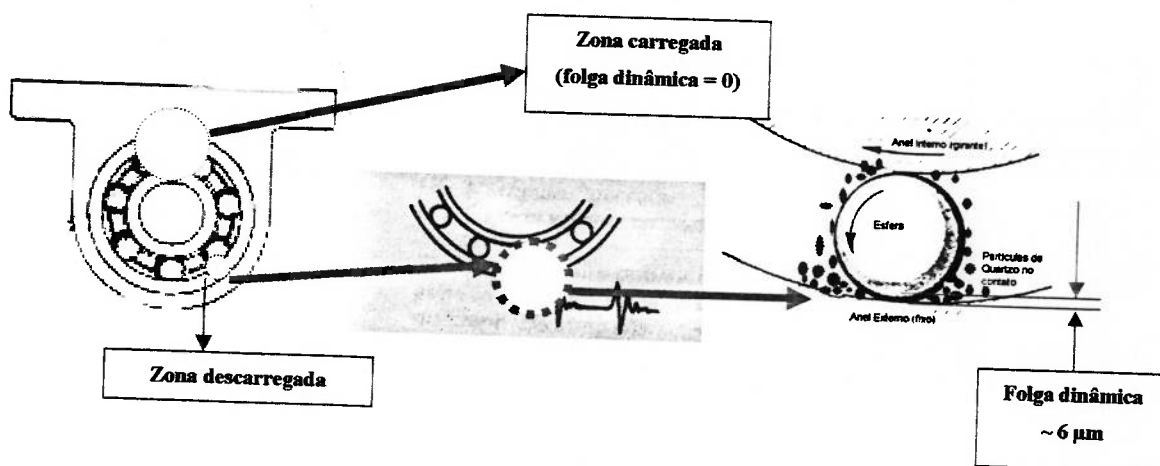


Figura 7-13: Detalhes da zona descarregada do rolamento.

A figura 7-13 traz detalhes das zonas carregadas e descarregadas do rolamento testado. A zona carregada de um rolamento é aquela onde a folga dinâmica é zero, ou seja, as pistas e esferas estão separadas somente pela espessura do filme lubrificante. Já na zona descarregada, cerca de 60 % da folga dinâmica total pode se encontrada, que para o rolamento em questão, vale cerca de 6 μm.

Observe a figura 7-14 extraída de Parker (2001).

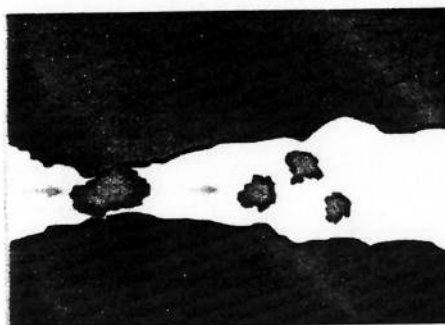


Figura 7-14. Partículas menores que a folga e filme lubrificante (Parker, 2001)

Quando partículas de tamanho inferior ou equivalente ao filme lubrificante do óleo de rolamentos entram em contato na zona descarregada de rolamentos, fenômenos de quebra e fratura das mesmas em pedaços de menor tamanho são passíveis de ocorrerem, dependendo de alguns fatos. Assim sendo, dependendo da quantidade desse contaminante, de sua concentração, tipo e tamanho, das cargas aplicadas e da dureza e morfologia do contaminante, é razoável supor que partículas contaminantes se fragmentem em outras de menor tamanho e permaneçam em suspensão no banho de óleo ou se decantem, dependendo das condições operacionais, tais como, viscosidade do óleo, velocidade de agitação do banho, etc..

Já a figura 7-15 da mesma referência, sugere um mecanismo de contato da zona descarregada onde as partículas são de tamanho predominantemente superiores aos das folgas, fazendo com que o contato provável de sobreposição do corpo rolante sobre o contaminante se dê na forma de impactos, gerando níveis de energia maiores.

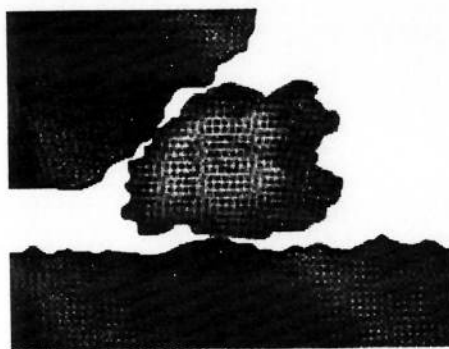


Figura 7-15. Partículas maiores que a folga e filme lubrificante (Parker, 2001)

Fazendo uso da analogia com as figuras 7-14 e 7-15, sugere-se uma explicação (não comprovada experimentalmente) para o comportamento dos valores de RMS SI serem tanto maiores quanto maior foram os tamanhos de partículas. Mesmo tendo sido formada uma deposição de contaminante sobre o rolamento, algumas partículas de contaminantes que não foram quebradas, quando presentes na zona descarregada a precisavam ser “escaladas”. A energia de impacto para se “escalar” a partícula teria sido a responsável pelos maiores valores de RMS SI para maiores tamanhos de partículas. Esse efeito também foi verificado quando se calculou os RMS AF para as rotações de 20, 30 e 40 Hz, porém não foi constatado para 50 e 60 Hz. Os RMS BF também não evidenciaram esse comportamento.

Concluindo a segunda fase experimental podemos registrar algumas constatações experimentais:

- Contaminação:
 - a medida em que se aumentou o tamanho do contaminante, a quantidade total de partículas no banho inicialmente se elevou (**trituração**) para em seguida diminuir (**decantação**);
- RMS SI da aceleração (nível de vibração):
 - eleva-se muito com o aumento da rotação e acompanha de forma relativa o aumento da carga aplicada;
- Correlação contaminação – vibrações:
 - numa mesma velocidade de rotação e numa mesma carga aplicada, para uma mesma concentração, o contaminante que possui **maior tamanho proporciona maior valor de RMS SI;**

- excelente correlação contaminação-vibração pode ser realizada caso se registre a contaminação em massa de contaminante /massa de lubrificante;
- inadequada correlação se realiza quando se tenta comparar a contaminação medida pela norma ISO com o valor de RMS de aceleração. Os mesmos podem evoluir de forma inversa e diferenciada.

7.3. 3ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações utilizando óleos com contaminação controlada: faixa de tamanho constante e concentração variável

Nesta terceira fase experimental, fixou-se uma faixa de tamanho de contaminante (105 a 75 μm) e foi variado sua concentração em peso em cada uma das condições de contaminação. O objetivo foi avaliar se a concentração de contaminante, para uma determinada faixa de tamanho, causa algum tipo de impacto na assinatura das vibrações do rolamento. Foram aquisitadas seis diferentes condições experimentais, referentes as condições “1a” até “1f”, conforme Tabela 6-3:

- 0,010 g/l, discriminada como condição experimental “1a”;
- 0,020 g/l, discriminada como condição experimental “1b”;
- 0,10 g/l, discriminada como condição experimental “1c”;
- 1,0 g/l, discriminada como condição experimental “1d”;
- 2,0 g/l, discriminada como condição experimental “1e”;
- 5,0 g/l, discriminada como condição experimental “1f”

A idéia da utilização de alguns desses níveis de contaminação foi a de reproduzir concentrações citadas pela norma ISO 4406, porém com outro tamanho de partículas. A referida norma sugere que um óleo com grau de contaminação ISO 10, possui cerca de 0,01 mg/l de quantidade de poluente ACFT, uma areia especial, com cerca de 16 μm de diâmetro, utilizada para calibração de filtros. Os resultados foram dispostos em tabelas e gráficos, que apresentam a tendência do comportamento da contaminação na experiência, como também dos valores de vibrações.

7.3.1 Resultados das medidas do nível ISO de contaminação pelo contador de partículas

Em função do elevado tempo necessário para registrar os níveis ISO através do contador de partículas (em torno de 120 s para cada registro aproximadamente) estas medidas foram realizadas apenas para as frequências de 20 e 60 Hz.

Mesmo com poucos pontos registrados, pôde-se obter uma boa idéia do comportamento da contaminação durante os ensaios.

Tabela 7-6 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1 a”

Quartzo 105 a 75 µm		0,010 g/l		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1a					MEDIÇÕES		RMS SI
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Oleo (oC)	Médias (mm ² /s)
20	36,58	296	24/23/21	> 15	SDPC	6356991	1409023	847871	8613885	27,10	0,7381
60	36,58	297	22/22/21	> 15	SDPC	SDPC	174079	2424831	2598910	26,00	2,0324
20	85,78	298	22/22/21	> 15	SDPC	SDPC	1712127	1941503	3653630	27,30	0,7264
60	85,78	299	24/23/21	> 15	SDPC	11730943	1794047	843775	14368765	26,00	1,8591
20	136,45	300	24/23/21	> 15	SDPC	6029311	1294335	708607	8032253	26,60	0,7336
60	136,45	301	24/23/21	> 15	SDPC	15532031	860159	282623	16674813	26,00	1,8006

A notação registrada na tabela 7-6, referente aos dados da condição de contaminação “1a”, denominado SDPC (iniciais das palavras Sujo Demais Para Contar) e que foi reportada pelo contador de partículas precisa ser discutida. A quantidade de contaminante no banho era mínima (0,010 g/l) e mesmo assim, o aparelho acusou saturação. É possível que partículas de tamanho grande tenham se sobreposto e sido contadas em excesso pelo aparelho durante os registros.. Percebe-se que essa situação de saturação se deu para todas as condições de carga na faixa de partículas > 2 µm e para dois casos das partículas > 5 µm. A ocorrência sugere a ocorrência de uma saturação desse tamanho de partícula no banho, porém no caso, o contaminante não estava presente. Há evidências que tenha ocorrido erros de medição experimental do aparelho utilizado.

Conforme descrito no item 3.2.3, o contador de partículas utilizado na parte experimental trabalha com um sensor óptico a laser. Esse sensor opera por escurecimento de partículas. Partículas de tamanho muito grande, mesmo com a baixa concentração de 0,01 g/l, podem influenciar negativamente essa contagem, fazendo com que o sensor interprete uma quantidade grande de partículas, ao passo que efetivamente no óleo, poucas partículas estavam em suspensão. Trata-se de uma limitação de registro do aparelho.

Também neste tipo de condição observam-se valores menores de RMS em comparação àqueles registrados na primeira fase de resultados, referente aos óleos limpos.

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no **Anexo 10**.

Os próximos resultados, mostrados através da tabela 7-7, referem-se a alguns dados da condição experimental "1b", ou concentração de 0,020 g/l. Os procedimentos foram mantidos e a tabela mantém a formatação das anteriores.

Tabela 7-7 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição "1b"

Quartzo 105 a 75 µm		0,020 g/l	NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1b							MEDIÇÕES		RMS SI
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Óleo (oC)	Médias (mm ² /s)	
20	36,58	302	22/21/17	13	1662975	1220607	81919	34303	2999804	27,90	0,7017	
60	36,58	303	20/19/16	12	460799	368639	36863	16895	883196	26,10	1,7712	
20	85,78	304	21/20/16	11	929791	462847	28671	12415	1433724	28,00	0,7127	
60	85,78	305	23/21/16	13	2981887	1056767	28159	8063	4074876	28,00	1,8661	
20	136,45	306	22/20/15	12	2621439	647167	20991	7423	3297020	27,80	0,7290	
60	136,45	307	22/21/20	13	978943	712703	258047	249855	2199548	26,00	1,8557	

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no **Anexo 11**.

Aparentemente, o efeito da tamanho na partícula na determinação da contagem de partículas influencia fortemente a medição da contaminação, fazendo com que os resultados variem excessivamente entre as condições experimentais. As condições SDPC não foram registradas.

Dando seqüência aos resultados, a próxima tabela refere-se a condição experimental "1c". A tabela 7-8 traz o registro dos resultados dessa condição.

Tabela 7-8 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição "1c"

Quartzo 105 a 75 µm		0,10 g/l	NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1c							MEDIÇÕES		RMS SI
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Óleo (oC)	Médias (mm ² /s)	
20	36,58	308	19/19/17	10	154623	177151	20479	99327	451580	28,00	0,7597	
60	36,58	309	19/18/15	10	231423	163839	11711	4959	411932	26,10	1,8586	
20	85,78	310	21/19/17	10	733183	226303	21375	104447	1085308	27,50	0,7747	
60	85,78	311	21/18/14	11	1343487	205823	7647	3343	1560300	26,20	2,0286	
20	136,45	312	21/18/14	10	1228799	166911	5343	2735	1403788	27,60	0,8547	
60	136,45	313	21/18/13	10	1441791	187391	4767	2255	1636204	27,00	2,0150	

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexos 11 e 12.

Os próximos resultados, mostrados através da tabela 7-9, referem-se a condição experimental “1d”, banho de óleo contaminado com 1,0 g/l de quartzo.

Tabela 7-9 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1d”

Quartzo 105 a 75 µm		1,0 g/l	NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1d							MEDIÇÕES		RMS SI
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Óleo (°C)	Médias (mm ² /s)	
20	36,58	314	21/20/18	11	987135	475135	39679	133119	1635068	28,00	0,7279	
60	36,58	315	21/19/16	11	10644959	411647	22143	10943	1509692	26,00	1,7018	
20	85,78	316	21/19/15	11	1138687	374783	19711	8255	1541436	26,40	0,7114	
60	85,78	317	21/19/15	11	1003519	305151	16511	7007	1332188	26,10	1,6000	
20	136,45	318	22/20/16	11	1687551	475135	27135	13695	2203516	26,60	0,6557	
60	136,45	319	22/20/16	12	1802239	581631	36351	15423	2435644	26,10	1,5071	

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexo 12

Dando sequência aos resultados, a tabela 7-10 refere-se a condição experimental “1e”, que corresponde a adição de 2 g/l de quartzo no óleo de teste.

Tabela 7-10 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1e”

Quartzo 105 a 75 µm		2,0 g/l	NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1e							MEDIÇÕES		RMS SI
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Óleo (°C)	Médias (mm ² /s)	
20	36,58	320	23/22/18	13	3620863	1941503	143369	84991	5790716	27,90	0,4638	
60	36,58	321	23/22/18	13	4079615	2007039	132095	68095	6286844	26,60	1,0301	
20	85,78	322	24/23/19	14	5963775	3751935	153599	150527	10019836	27,60	0,3789	
60	85,78	323	24/22/19	14	6062079	2670591	109065	200703	9042428	26,30	2,2021	
20	136,45	324	24/22/18	14	6520831	2949119	97791	47615	9615356	27,10	0,7170	
60	136,45	325	24/22/18	14	6422527	3391487	96767	40959	9951740	26,10	2,4222	

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexo 13.

Dando sequência aos resultados, a última tabela desta sequência refere-se a condição experimental “1f”, identificada pela adição de 5 g/l de quartzo na faixa de 105 a 75 µm. A tabela 7-11 traz o registro dos resultados da condição.

Tabela 7-11 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1f”

Quartzo 105 a 75 µm		5,0 g/l	NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1f							MEDIÇÕES		RMS SI
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Óleo (oC)	Médias (mm ² /s)	
20	36,58	326	24/22/18	14	6029311	3768319	137215	89599	10024444	27,60	0,7578	
60	36,58	327	24/23/19	> 15	5242879	5570559	190463	82943	11086844	26,20	1,8263	
20	85,78	328	24/23/19	> 15	2949119	9633791	261119	97791	12941820	28,00	0,7820	
60	85,78	329	24/23/19	> 15	2654207	10158079	270335	108543	13191164	26,70	2,2974	
20	136,45	330	24/23/19	> 15	1400831	12320767	319487	116223	14157308	27,20	0,8690	
60	136,45	332	24/23/20	> 15	SDPC	16515071	450559	135167	17100797	27,90	2,7552	

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexos 13 e 14.

7.3.2 Resultados do RMS da aceleração

Até o momento foram mostrados detalhes do comportamento do ensaio de contagem de partículas ao longo das aquisições. Agora, iremos mostrar graficamente de que forma evoluiu o parâmetro RMS da aceleração em cada condição experimental e, em seguida, discutir eventuais correlações com os valores de contaminação.

O gráfico da figura 7-16. foi preparado de modo a dar uma visão geral do comportamento dos valores de RMS para todas as condições experimentais e para valores de RMS SI, AF e BF. Os valores médios de três tipos de RMS da aceleração foram calculados e mostrados para cada um dos três carregamentos e para as cinco rotações testadas, gerando nove gráficos diferentes. Dentro de cada gráfico gerado foram mostrados em cores diferentes, como variaram os valores de RMS para as seis concentrações de contaminantes utilizados, desde a condição “1a” até a condição “1f”.

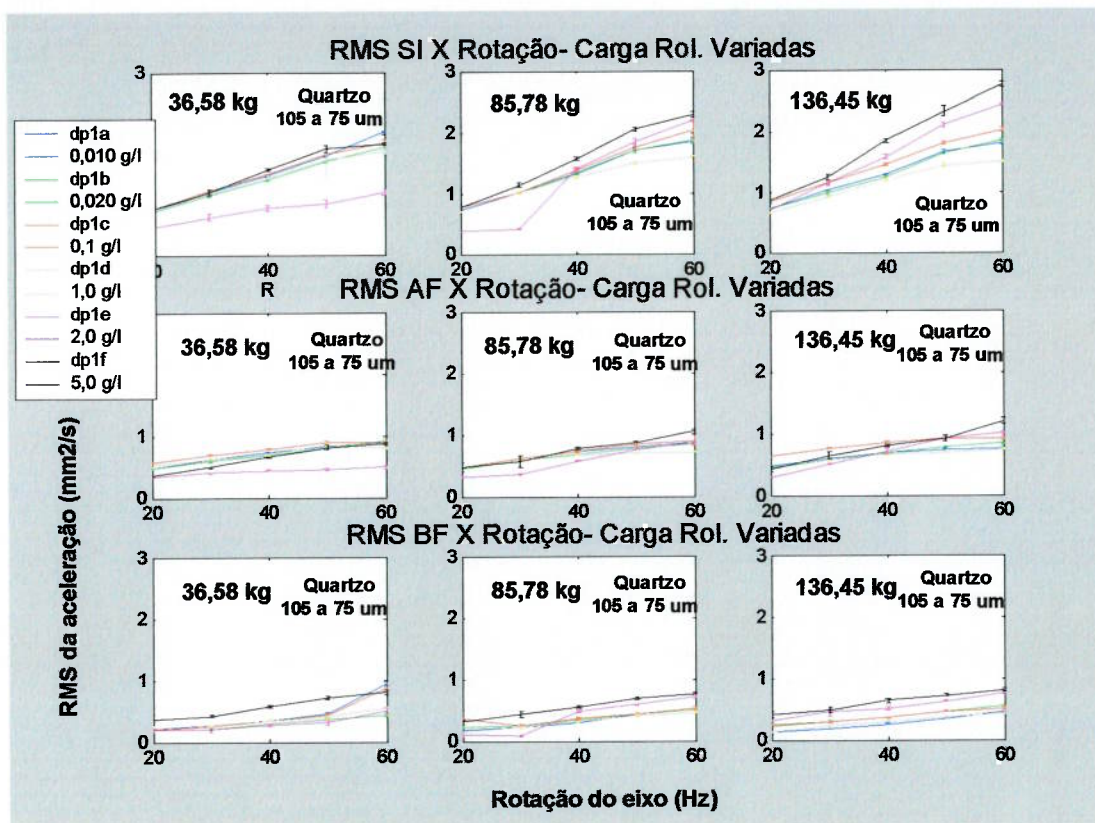


Figura 7-16 Gráficos do RMS nas três faixas de frequências X rotação do eixo – 3 cargas

Percebe-se que para alguns carregamentos e cálculos de RMS, a distinção entre concentrações fica prejudicada. É possível que aqui, também como nos casos de AF e BF da segunda fase de experiências, o corte da faixa de frequência do espectro que foi adotado não tenha contribuído o suficiente para uma adequada distinção entre concentrações. Entretanto, há casos como no gráfico RMS SI com 136,45 kg, que esta identificação ficou bem caracterizada.

A seguir, serão mostrados e comentados rapidamente da um dos nove gráficos gerados.

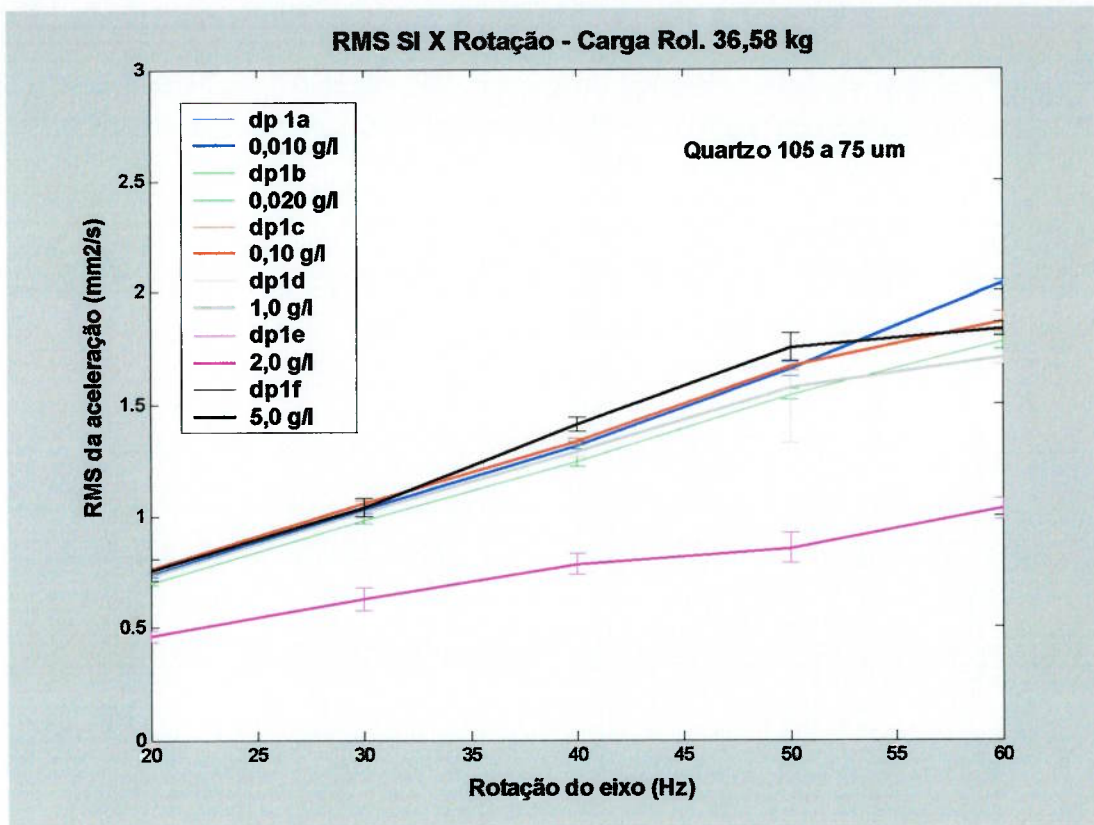


Figura 7-17. Gráfico de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg

Observando-se o gráfico da figura 7-17 que mostra os resultados obtidos com o carregamento de 36,58 kg, percebe-se que os resultados do RMS SI mantém a tendência dos experimentos anteriores, ou seja, aumentam conforme a elevação da rotação. Todas as condições de contaminação, exceto a de 2,0 g/l, que variou de forma diferente, apresentaram valores próximos uns dos outros em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças de concentração.

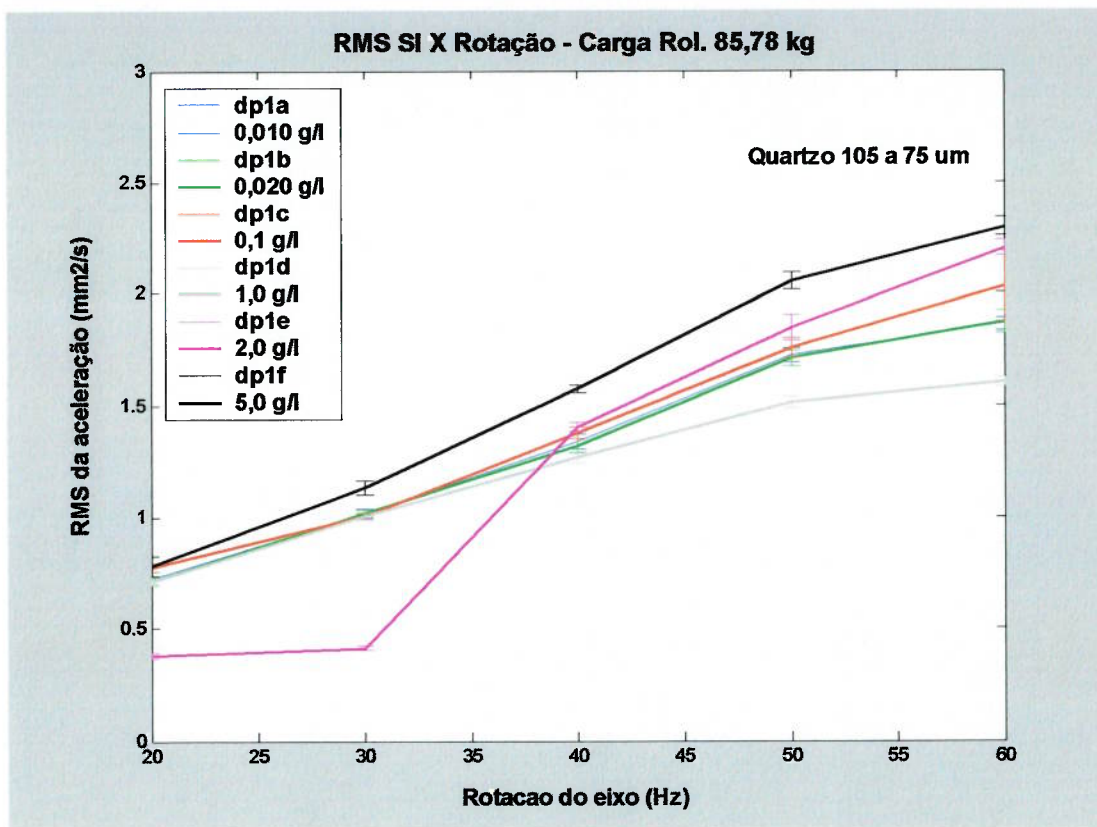


Figura 7-18 Gráfico de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg

Observando-se os resultados do gráfico da figura 7-18, carregamento de 85,78 kg, percebe-se também que o RMS SI aumenta com a rotação. No entanto, com este carregamento, ao contrário do anterior, já percebem-se diferenças em relação ao nível de contaminação. Os maiores valores de aceleração correspondem àqueles de maior concentração de contaminantes (condição “1f”). Novamente a condição “1e”, que equivale a 2,0 g/l, apresentou em algumas rotações, um comportamento bastante diferente das demais.

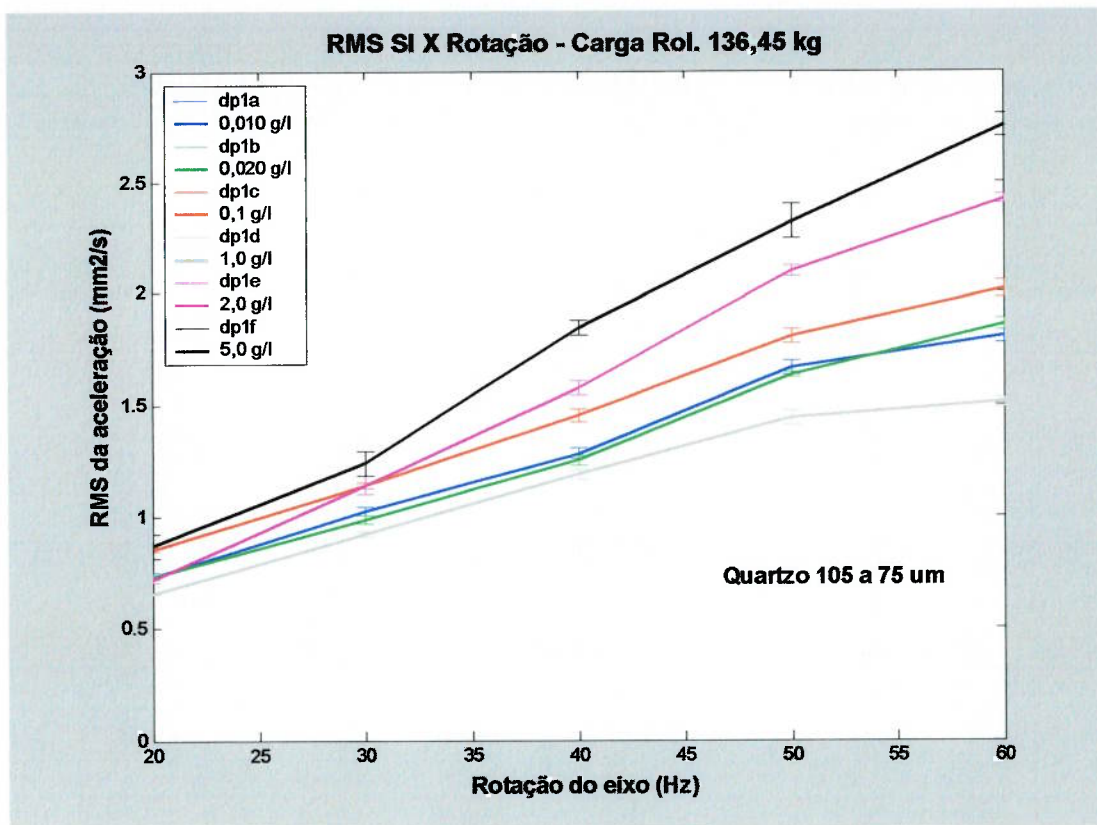


Figura 7-19 Gráfico de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg

O gráfico da figura 7-19 refere-se ao maior carregamento, e nele observamos outro tipo de comportamento. Mantida a relação RMS SI com rotação, verifica-se que as duas maiores concentrações de contaminantes (“1e e 1f”) apresentam os maiores valores de vibrações. Isto sugere a possibilidade que o acúmulo excessivo de contaminante na região do contato possa ter influência no comportamento e na quantificação do valor do RMS SI.

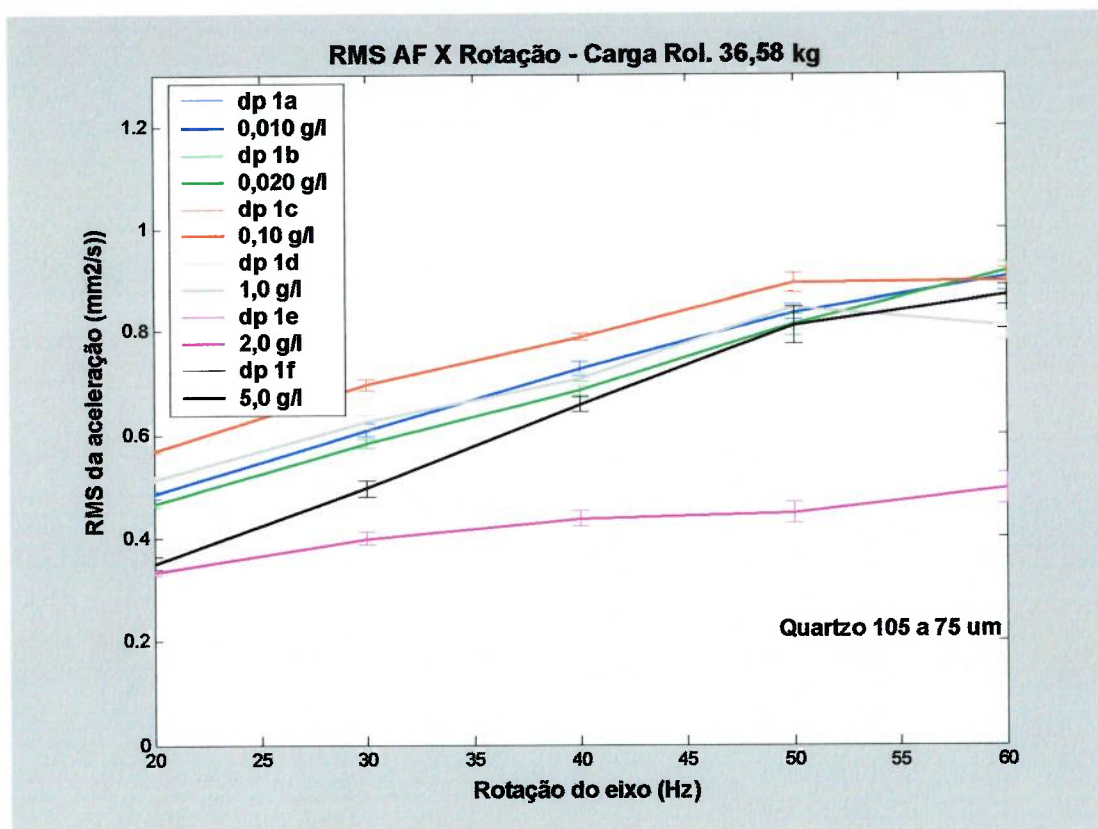


Figura 7-20 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg

O gráfico da figura 7-20 apresenta os resultados obtidos com o carregamento de 36,58 kg. Analisados dessa forma, RMS AF também acompanha a rotação, porém há concentrações em 60 Hz onde isto não ocorreu. Todas as condições de contaminação, exceto a “1e” de 2,0 g/l, com o menor valor de todas, e a “1c” de 0,10 g/l, com o maior valor de todas (exceto para 60 Hz), apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças.

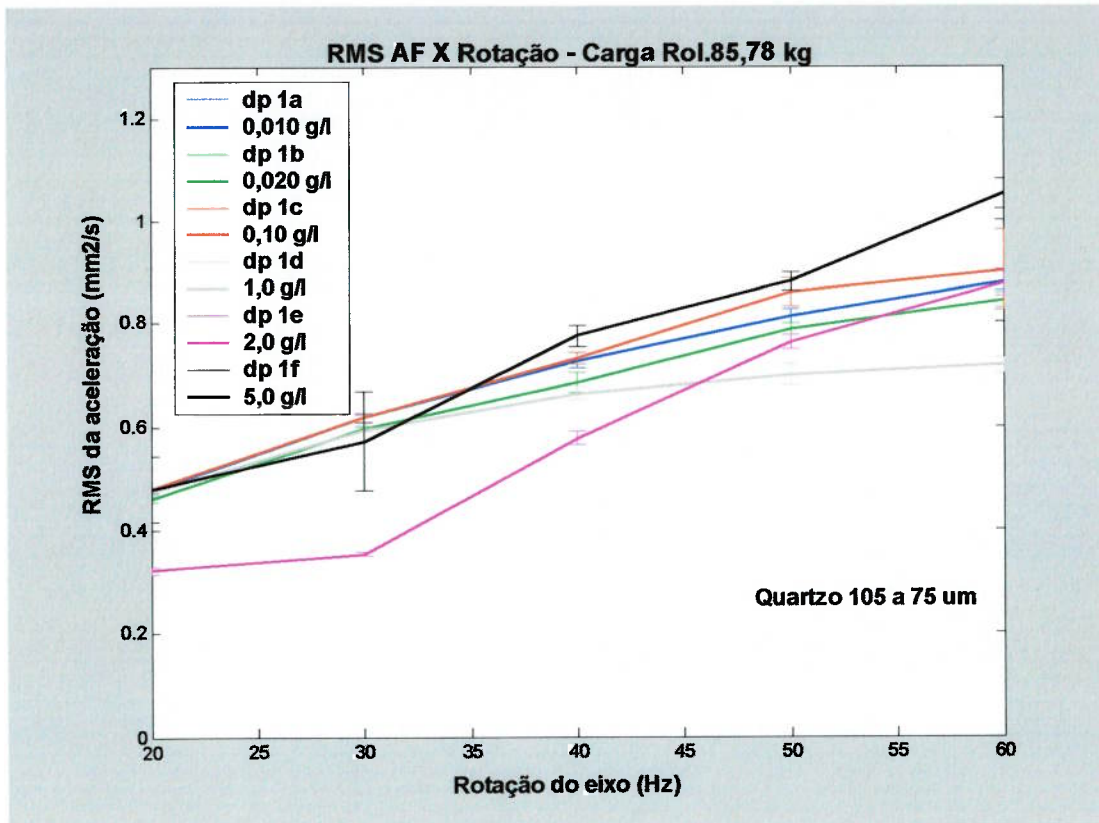


Figura 7-21 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg

O gráfico da figura 7-21 referente ao carregamento de 85,78 kg, em algumas rotações, a condição “1e” de 2,0 g/l, apresenta destacadamente o menor valor de RMS AF entre todas. As demais condições apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças.

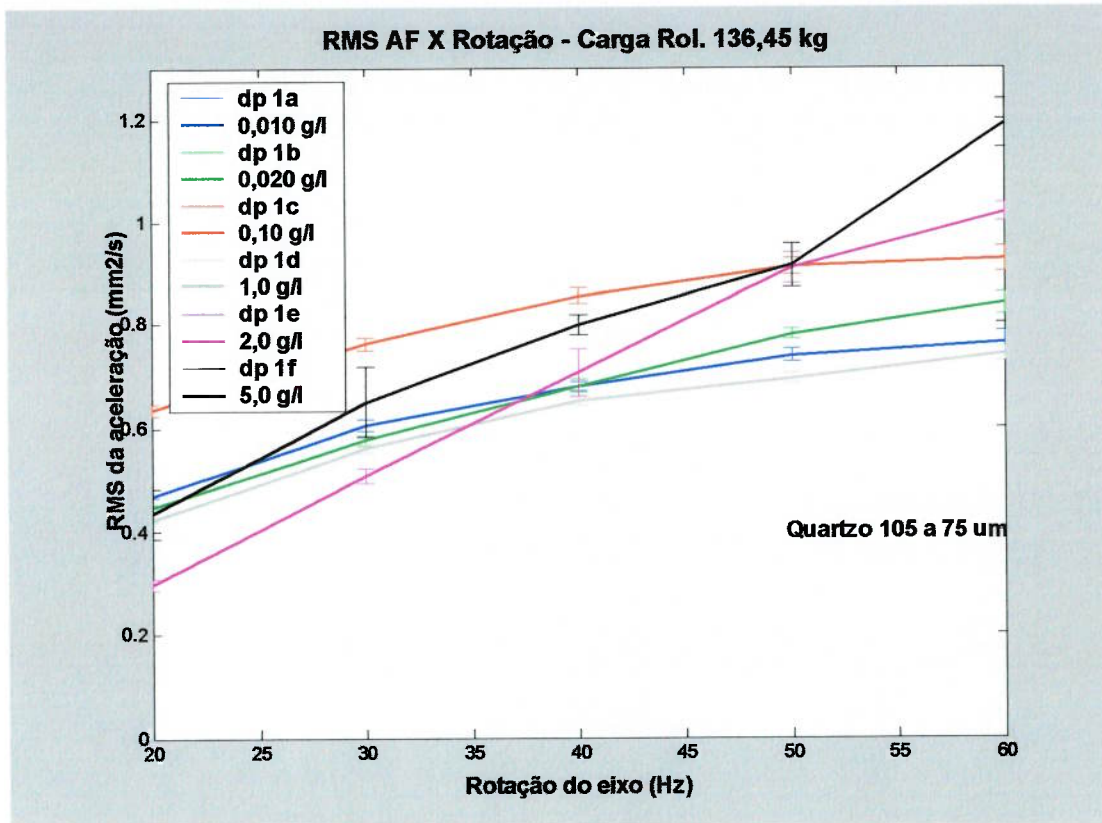


Figura 7-22 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg

Segundo o gráfico da figura 7-22, para o carregamento de 136,45 kg, para todas as rotações e condições de concentração, os valores de RMS AF se interceptam, sendo difícil identificar diferenças significativas ou algum comportamento específico entre as condições testadas.

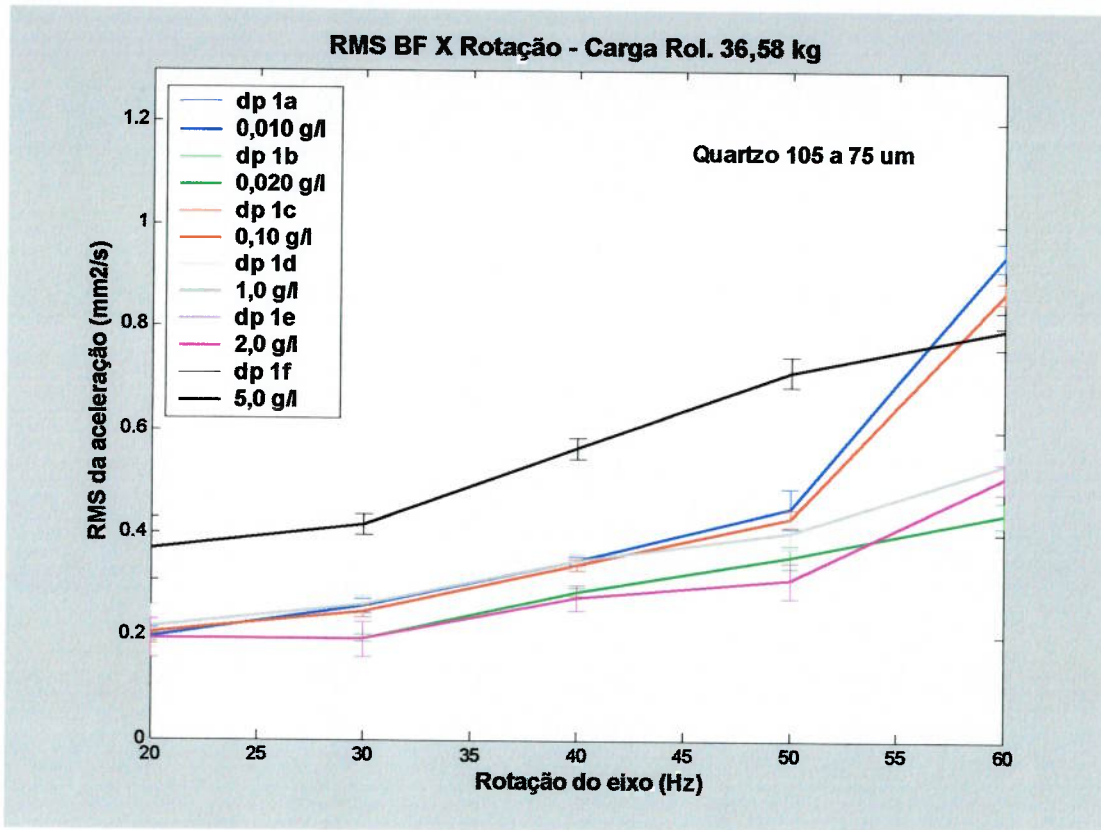


Figura 7-23 Gráfico de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg

Observando-se o gráfico da figura 7-23 referente aos resultados obtidos com o carregamento de 36,58 kg, utilizando o RMS BF. Observa-se um aumento do RMS BF com a rotação, independente do nível de contaminação. Todas as condições de contaminação, exceto a “1f” de 5,0 g/l, com o maior valor de todas (exceto para 60 Hz), apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, com algumas pequenas variações, ficando difícil identificar diferenças. A condição “1f” se destaca por ser a de maior valor de RMS BF, exceto na frequência de rotação de 60 Hz.

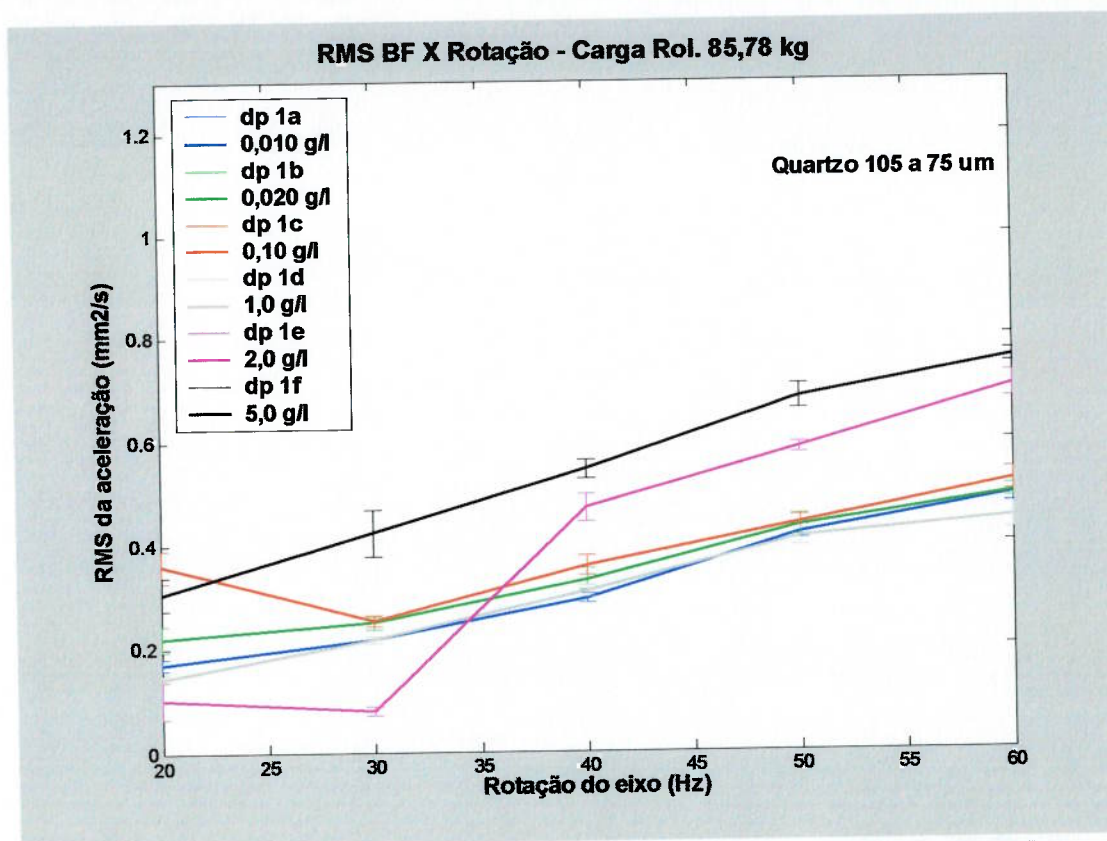


Figura 7-24 Gráfico de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg

No gráfico da figura 7-24, aparecem os resultados do RMS BF para uma carga de 85,78 kg, todas as condições de contaminação, exceto a “1f” de 5,0 g/l, com o maior valor de todas (exceto para 20 Hz), seguida da condição “1e” de 2,0 g/ (exceto para 20 e 30 Hz), apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças.

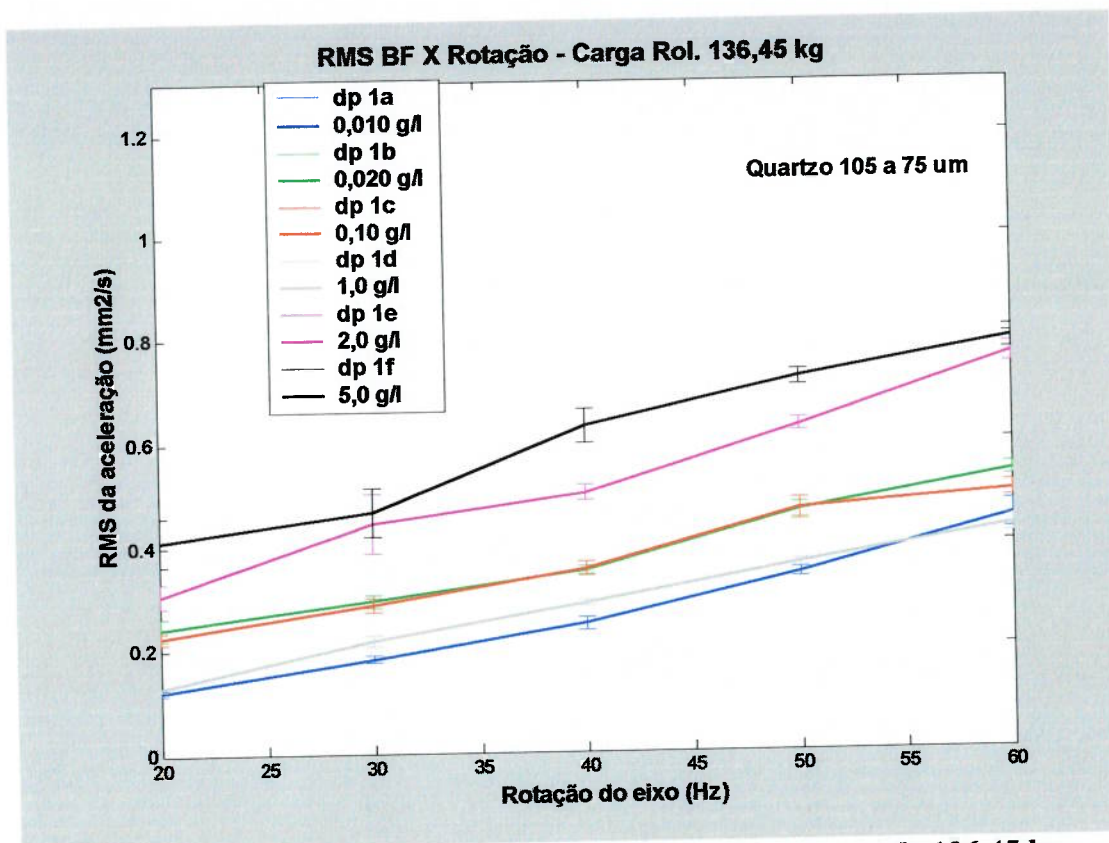


Figura 7-25 Gráfico de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg

Finalmente, o gráfico da figura 7-25 apresenta os resultados do RMS BF para uma carga de 136,45 kg, todas as condições de contaminação, exceto a “1f” de 5,0 g/l, com o maior valor de todas (exceto para 30 e 60 Hz), seguida da condição “1e” de 2,0 g/l (exceto para 30 e 60 Hz), apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças.

7.3.3. Correlação de resultados entre nível ISO de contaminação e vibração

A avaliação da correlação entre os registros da contaminação e os valores medidos e calculados do RMS SI para todas as condições experimentais foram feitos através dos gráficos das figuras 7-26, 7-27 e 7-28. Nesses gráficos todas as seis concentrações foram avaliadas em conjunto para cada uma das cargas aplicadas.

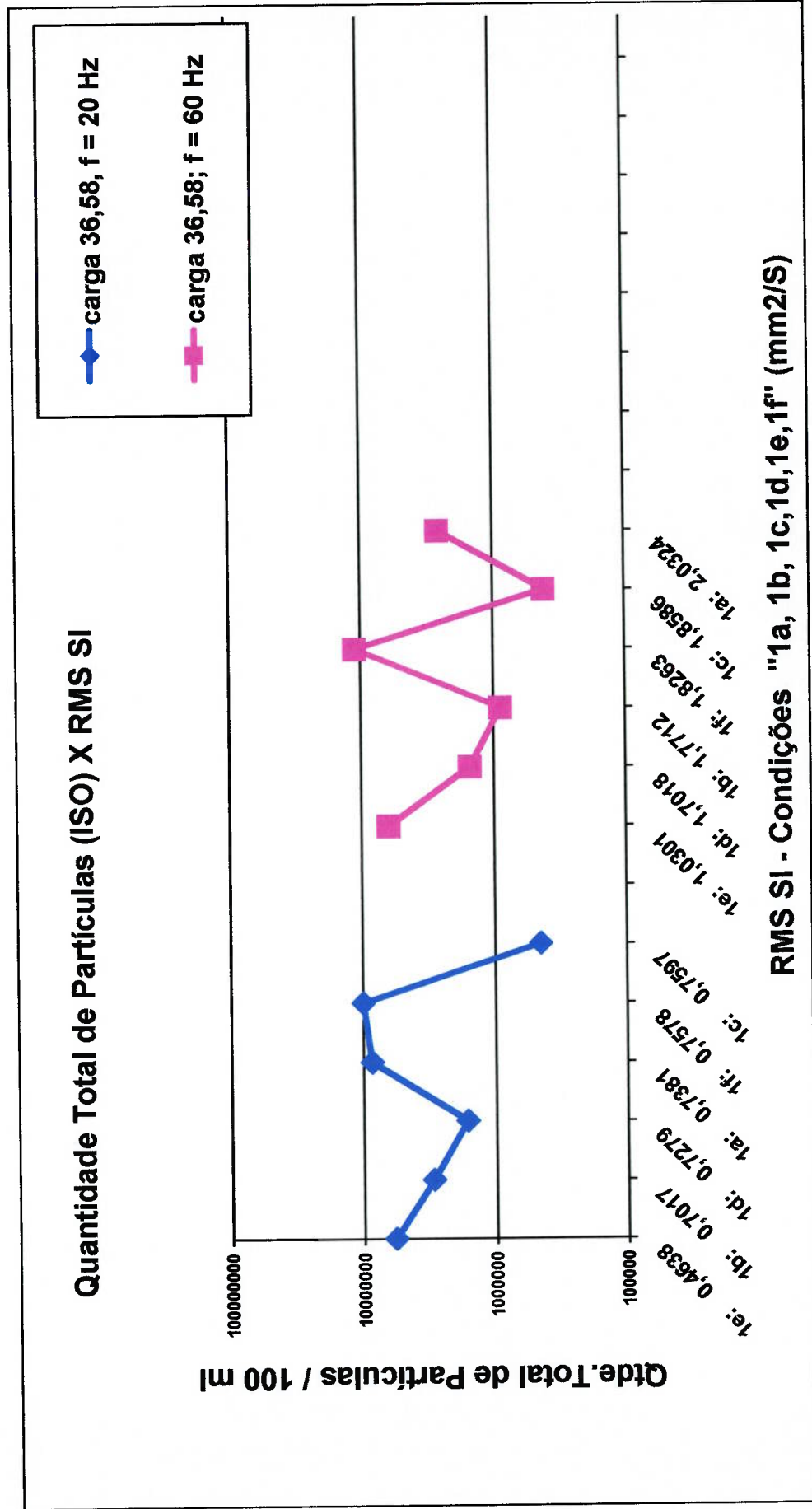


Figura 7-26 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – Carga de 36,58 kg

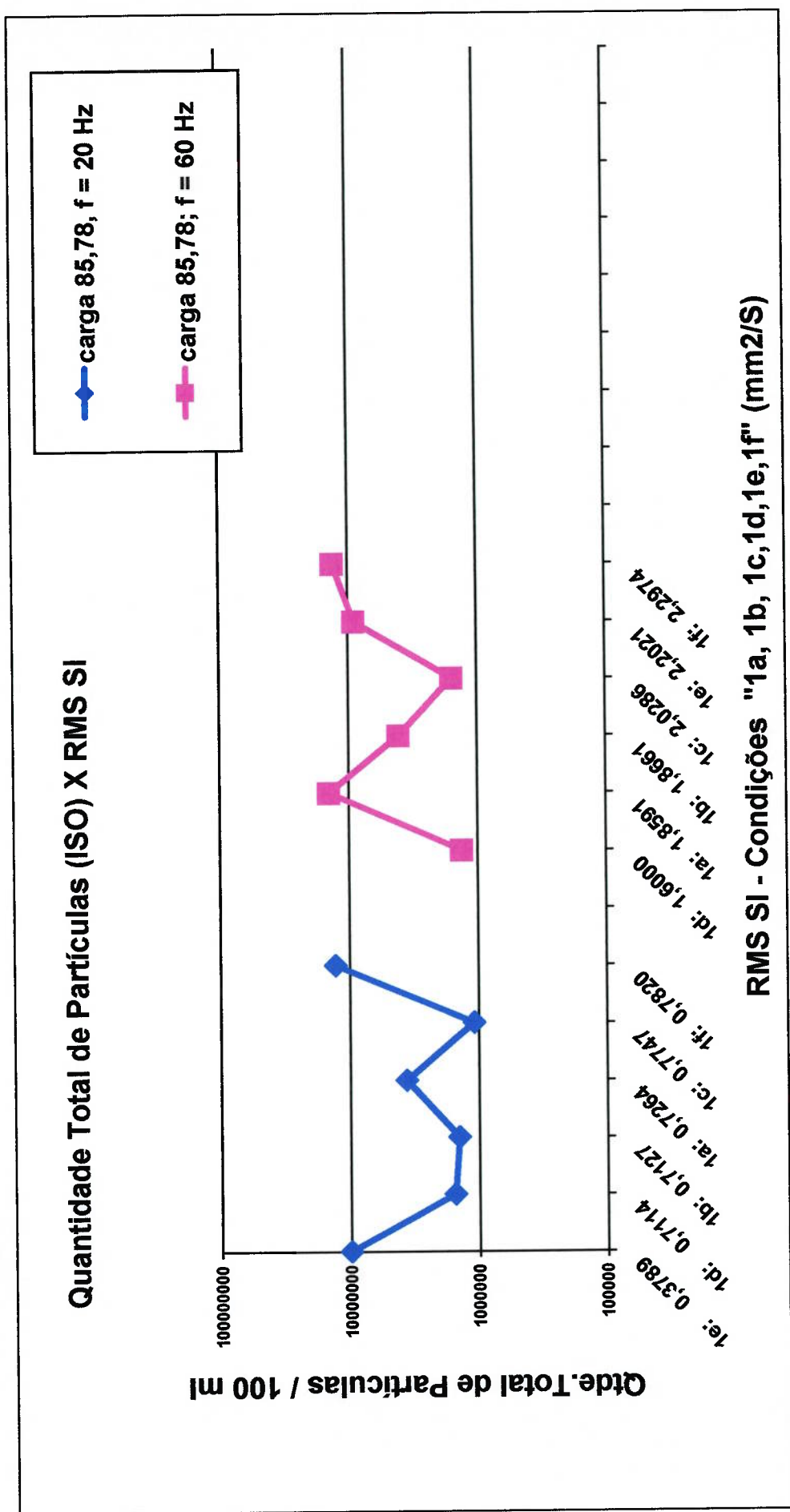


Figura 7-27 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 85,78 kg

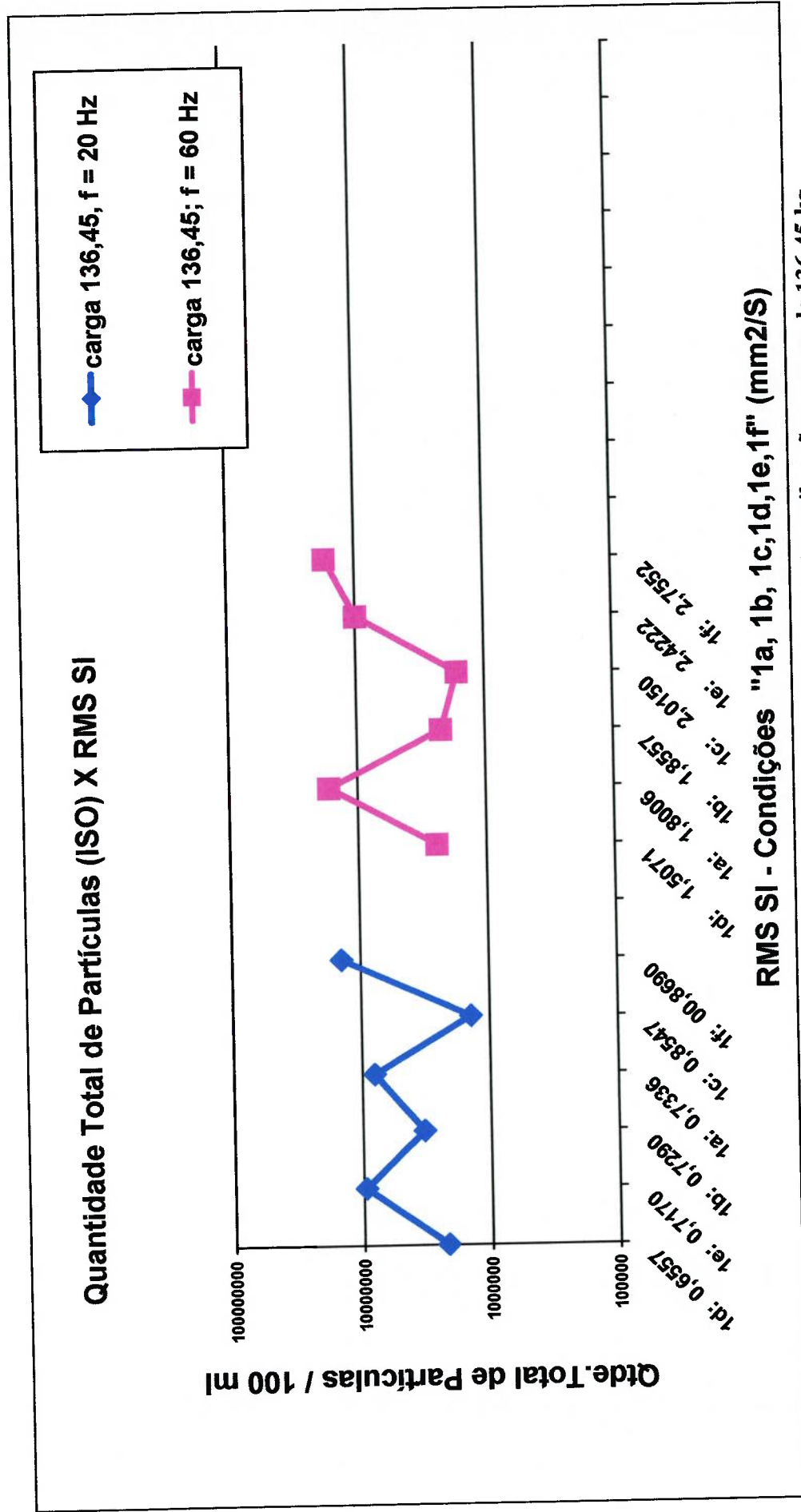


Figura 7-28 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 136,45 kg

Os gráficos das figuras 7-26, 7-27 e 7-28, foram divididos em três grupos, um para cada uma das cargas radiais aplicadas. Analisando-se os resultados podemos registrar que:

- nas seis variações executadas, as concentrações dos contaminantes não apresentaram um alinhamento lógico que acompanhe a evolução do RMS SI. Mesmo se descartarmos a condição "1a", pelos motivos já discutidos, o comportamento de queda do nível ISO que poderia **sugerir decantação** não se completa, pois a condição "1f" apresenta elevado nível ISO em todos os carregamentos;
- os resultados mostraram extrema diversidade que varia conforme a carga radial e a frequência de rotação, ou seja, não há um comportamento previsível e estável que possa ser estabelecido como predominante para as seis variações executadas;
- observa-se que a condição de contaminação "1f" (5,0 g/l) apresentou o maior valor de RMS SI em quatro das seis concentrações utilizadas;
- nas condições em que foram realizados os ensaios, os resultados sugerem a ocorrência de baixa correlação entre o valor do RMS SI da aceleração e a o nível ISO de contaminação definido pela concentração dos contaminantes utilizados.

7.3.4. Discussão dos resultados

Da mesma forma que na fase experimental anterior, para uma melhor discussão dos resultados foi elaborado uma tabela que resume como se deu o comportamento da contaminação em cada uma das etapas do ensaio. A mesma será discutida e em seguida o serão os resultados dos valores de vibração, fechando com comentários adicionais sobre a tabela de correlações entre contaminação e vibração.

A tabela 7-12. descreve o comportamento dos resultados de contaminação ao longo do desenvolvimento dos registros. Como já explicado anteriormente, registrou-se para cada carga aplicada, o nível de contaminação quando o rolamento estava operando a 20 Hz de rotação e um segundo registro foi realizado quando o rolamento operava em 60 Hz de rotação. Os símbolos triangulares refletem se o comportamento do grau de contaminação do óleo, ou seja, elevou-se, diminuiu ou manteve-se constante.

Tabela 7-12 Comportamento das partículas ao longo dos registros

	Condição Experimental	Partículas > 2 μm	Partículas > 5 μm	Partículas > 15 μm	Partículas > 25 μm	Qtde. Total de Partículas
1 a	36,58 kg	▲▼	▲	▼	▲	▼
	85,78 kg	▲▼	▼	▲	▼	▲
	136,45 kg	▲▼	▲	▼	▼	▲
1 b	36,58 kg	▼	▼	▼	▼	▼
	85,78 kg	▲	▲	▼	▼	▲
	136,45 kg	▼	▲	▲	▲	▼
1 c	36,58 kg	▲	▼	▼	▼	▼
	85,78 kg	▲	▲	▼	▼	▲
	136,45 kg	▲	▲	▼	▼	▲
1 d	36,58 kg	▲	▼	▼	▼	▼
	85,78 kg	▼	▼	▼	▼	▼
	136,45 kg	▲	▲	▲	▲	▲
1 e	36,58 kg	▲	▼	▼	▼	▲
	85,78 kg	▲	▼	▼	▲	▼
	136,45 kg	▼	▲	▼	▼	▲
1 f	36,58 kg	▼	▲	▲	▼	▲
	85,78 kg	▼	▼	▲	▲	▲
	136,45 kg	▲	▲	▲	▲	▲

Percebe-se pela tabela 7-12, expurgando-se a condição '1a', reportada como anormal, que a grande tendência verificada pelos resultados da contagem de partículas foi a de diminuição geral da quantidade de contaminantes no decorrer dos ensaios. No entanto, essa diminuição pode ser considerada pequena perto dos índices registrados, ou seja, mesmo sob efeito da filtração realizada pelo filtro interno do equipamento, as quantidades de partículas de contaminantes não diminuíram, e os níveis de contaminação medidos foram considerados muito elevados. Em função disso, é razoável supor que parte das partículas tenham se decantado e uma parcela delas tenha se alojado na região de contato da pista com os elementos rolantes.

A grande diversidade no alinhamento das retas observada na maioria dos resultados dessa terceira fase experimental pode estar relacionada ao nível de concentração do contaminante no banho. A figura 7-29 serve para ilustrar o possível mecanismo que teria ocorrido.

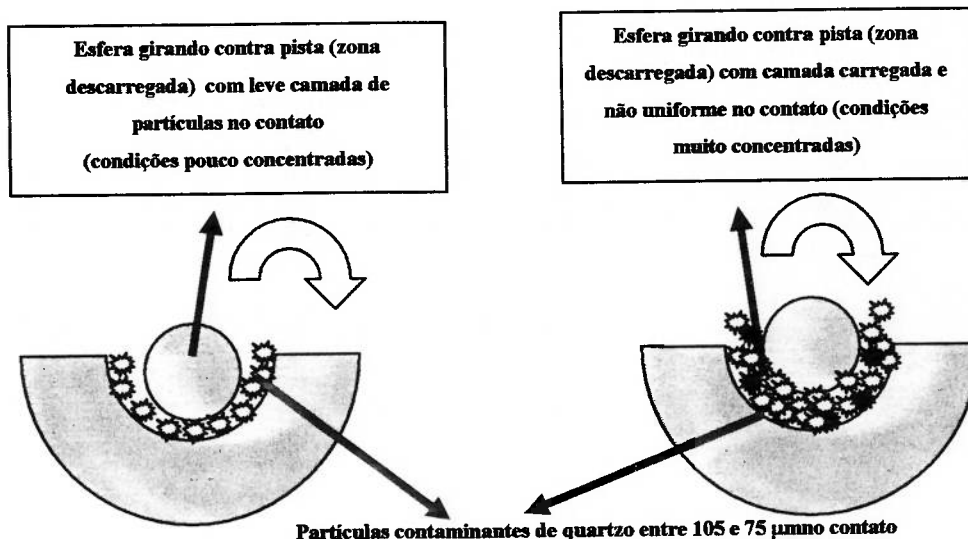


Figura 7-29 Possível mecanismo ocasionado por partículas de quartzo

É possível portanto, que devido a seqüência que esta fase experimental foi conduzida (a mesma utilizou seis seqüências consecutivas de partículas de mesmo tamanho e com concentrações diferentes), que a formação de deposição de partículas grandes de quartzo na zona descarregada do rolamento tenha se dado de forma irregular, ou seja, partículas poderiam se posicionar no contato de modo diferente dependendo da seqüência de teste, sugerindo uma medição não uniforme dos valores de RMS da aceleração.

Assim, analisando-se os nove gráficos de RMS em três carregamentos e em todas as faixas de frequências adotadas (Figuras 7-16 a 7-25), pudemos constatar que:

- analisando o RMS SI da vibração, o melhor alinhamento ocorreu com a carga radial de 136,45 kg (Figura 7-19);

- em 36,58 kg, para todas as faixas a condição "1e" (2,0 g/l) apresentou os menores valores, não existindo uma explicação razoável para esta constatação;
- a condição "1f" (5,0 g/l), com exceção da condição RMS AF e 136,45 kg, apresentou **sempre** os maiores valores de RMS, sendo que a hipótese que pode explicar esta constatação foi abordada no item 7.3.2;
- A avaliação da concentração de contaminantes através do RMS da vibração parece ser possível de ser realizada, para algumas condições de contaminação, dependendo da concentração e tamanho do contaminante e da quantidade prévia de saturação do banho de óleo.

Abordando agora o assunto correlação contaminação-vibração, percebeu-se que analisando-se as seis concentrações simultaneamente, baixa correlação contaminação-vibrações foi identificada. Entretanto, se dividirmos os resultados em dois grupos de concentração, um de baixa concentração (0,010 a 0,10 g/l), (expurgando-se da análise a condição "1a", reportada como anormal) e um segundo grupo de média-elevada concentração (1,0 a 5,0 g/l), percebe-se um comportamento diferente. Esses dois gráficos encontram-se nas figuras 7-30 e 7-31, colocadas na seqüência.

Constatou-se que: .

- Condições "1b e 1c": apresentam para a frequência de 20 Hz um comportamento parecido, que lembra o da segunda fase de ensaios. Aparentemente, quando as duas frequências de rotação e para as três cargas, há pequena tendência de quebra de partículas, sugerindo pequena **trituração (massa de pó baixa)** e grande decantação de partículas. Se desconsiderarmos a condição "1 a", a quantidade de partículas ISO cai conforme a concentração aumenta;
- Dessa forma, para todas as condições de contaminação, **a condição de maior concentração ("1c") tendeu a apresentar o maior valor de RMS SI**, exceção feita para a carga de 36,58 kg e 60 Hz;
- Já para as condições "1 d, 1e e 1f", que correspondem as maiores concentrações, o comportamento para carga leve sugere a ocorrência das já discutidas ocorrências de **decantação seguida de trituração de**

partículas. É possível que a concentração tenha influência nesse processo. Entretanto, esse comportamento também é instável e não se mantém para todas as cargas e velocidades. O gráfico da figura 7-31 mostra uma suposta mudança de condição onde esse fenômeno deixa de ocorrer (após frequência de rotação de 60 Hz e carregamento de 85,78 kg), pois conforme a concentração aumenta, aumenta o nível ISO e o RMS;

- Também aqui chama a atenção que para as três maiores condições de concentrações, a condição de maior concentração ("1f") apresentou o maior valor de RMS SI;

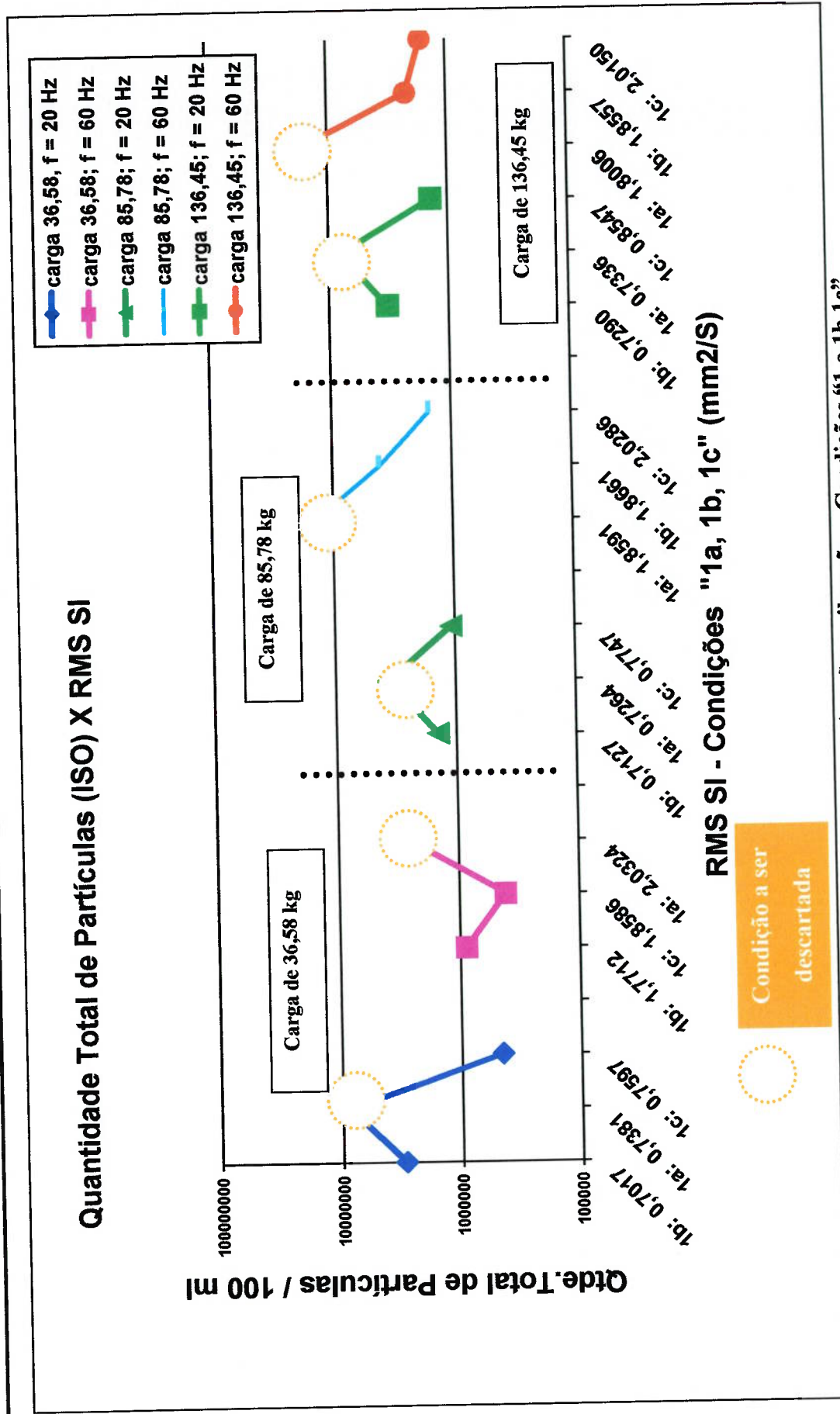


Figura 7-30 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – Condições “1 a,1b,1c”

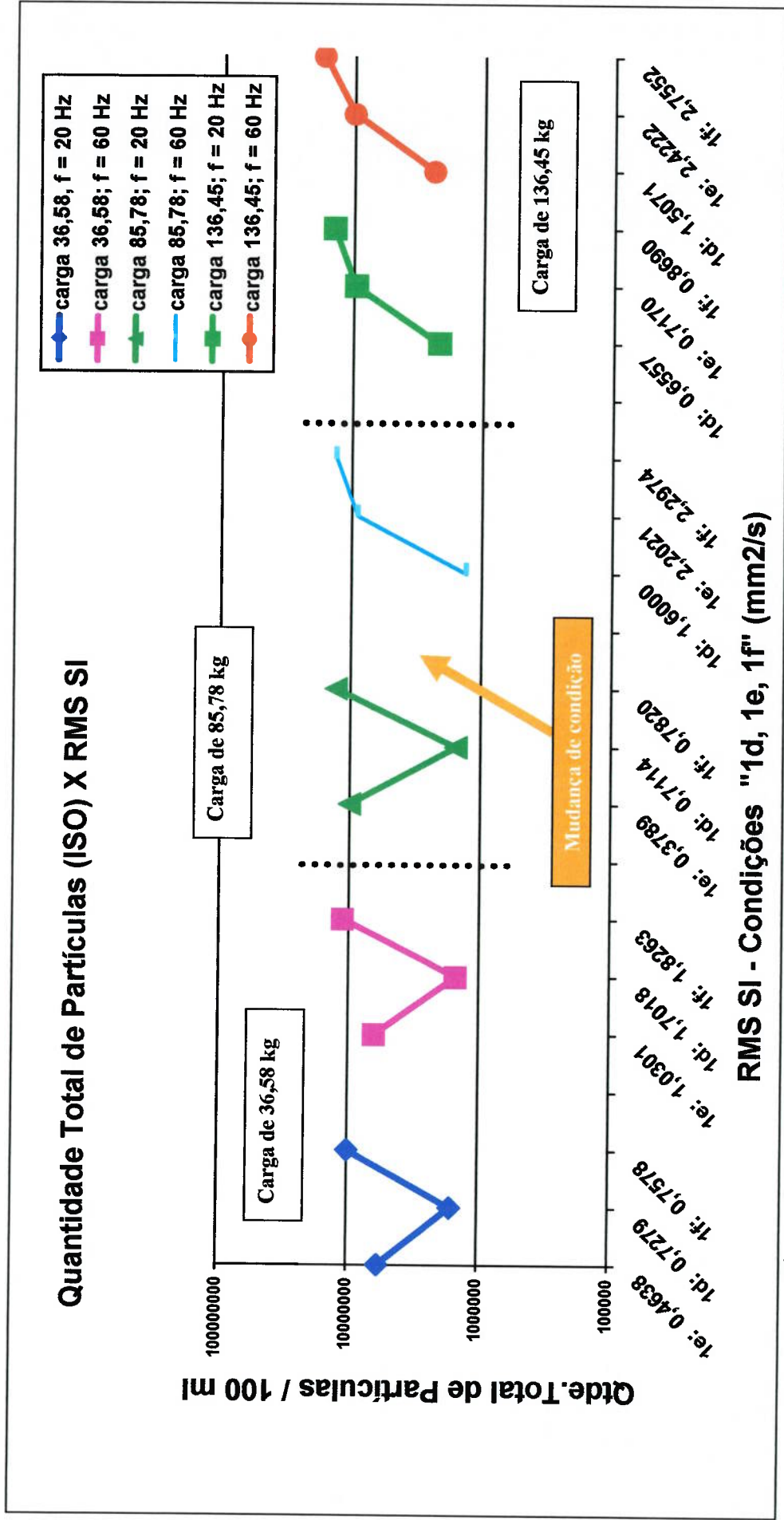


Figura 7-31 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – Condições "1d, 1e, 1f"

7.4. 4º Fase Experimental: Avaliação do comportamento da taxa de contaminação (g/l) X RMS da aceleração para óleos limpos e contaminados

Nesta quarta e última fase de experimentos, duas faixas de contaminantes foram utilizadas: uma menor do que 20 μm e outra entre 75 e 53 μm . Como visto no item 5.4, os tamanhos médios de partículas de quartzo encontrados no primeiro grupo foram de 16 μm e no segundo grupo 86 μm . Amostras de óleo com seis concentrações diferentes foram preparadas, conforme Tabela 6-3.

O objetivo desta quarta fase experimental é avaliar se a agitação forçada do banho de óleo, procedimento introduzido para se evitar ao máximo a decantação, pode influir na avaliação da contaminação através da vibração. Também nesta fase experimental faremos constatações de como ficou a superfície do rolamento e quais os impactos de desgaste (através de ferrografia) após a realização dos ensaios, visando avaliar impactos de contaminantes no desgaste e na vibração dos rolamentos.

Nesta fase as alterações realizadas nos ensaios foram a ausência do contador de partículas e a agitação manual forçada do banho. O objetivo dessa intervenção foi de fato poluir ao máximo o contato do rolamento, ou seja, visou-se simular a introdução contínua de contaminantes na zona descarregada pistas-esferas.

Nesta última fase experimental, durante o processamento dos sinais foram mantidos os mesmos critérios anteriores de cálculos dos valores de RMS, ou seja, para o sinal inteiro e filtrados em alta e baixa frequência. Os resultados são mostrados através de gráficos agrupados onde pode-se analisar melhor o efeito da presença do contaminante no contato dos rolamentos.

7.4.1. Óleos sem contaminantes e com contaminantes menores que 20 μm

Foram aquiridas na primeira parte da experiência, cinco diferentes condições experimentais, referentes a tamanhos de contaminantes entre 0 e 20 μm .

Inicialmente os sinais dos rolamentos com óleo lubrificante sem contaminante foram coletados, condição que será considerada como condição base para comparações. Em seguida, realizaram-se aquisições com óleos contaminados, utilizando faixas de tamanho e concentrações conhecidas, conforme tabela 6-3.

Foram preparadas as seguintes amostras:

- 0,10 g/l de quartzo entre 0 e 20 μm , discriminada como condição experimental “2c”;
- 1,0 g/l de quartzo entre 0 e 20 μm , discriminada como condição experimental “2d”;
- 5,0 g/l de quartzo entre 0 e 20 μm , discriminada como condição experimental “2f”;
- 10,0 g/l de quartzo entre 0 e 20 μm , discriminada como condição experimental “2g”.

Os resultados serão mostrados na forma de gráficos. Inicialmente, apenas para efeito comparativo, serão plotadas conjuntamente todas as condições experimentais. O segundo gráfico será idêntico ao primeiro, retirando-se do mesmo a condição limpa. Em seguida mostraremos em detalhes algum dos gráficos onde fique evidenciado uma diferenciação entre as condições de contaminação.

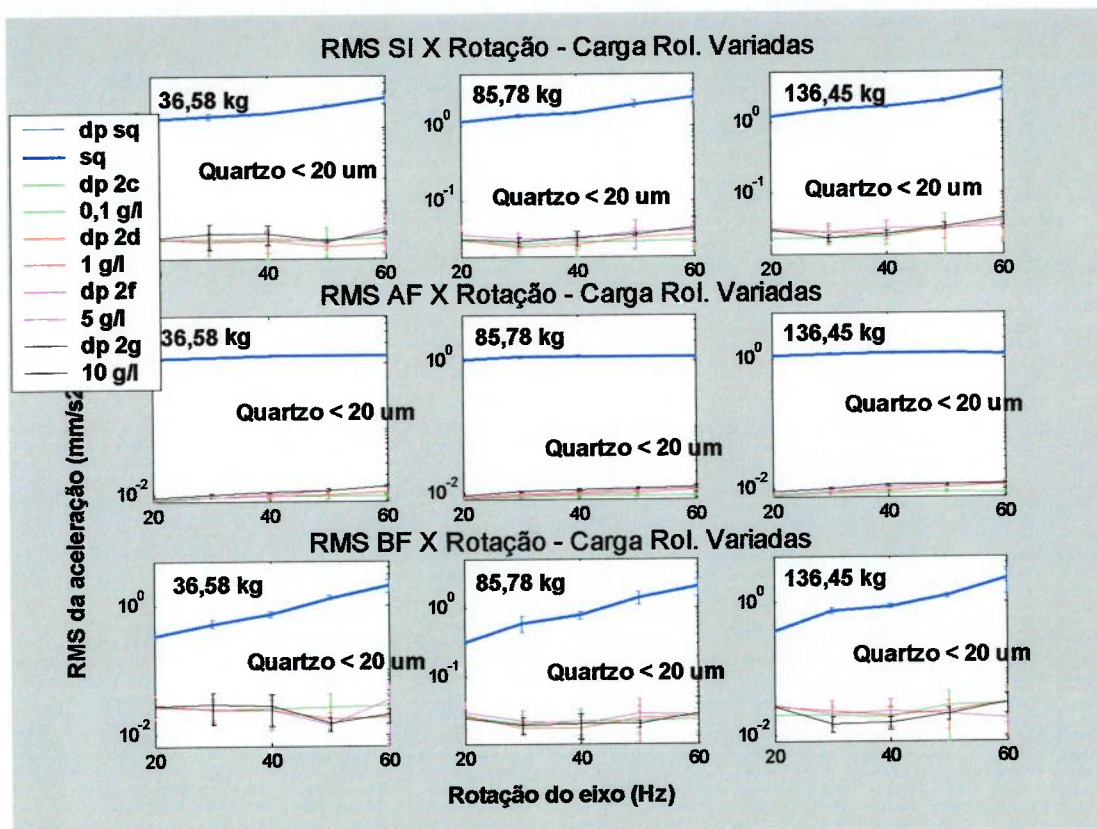


Figura 7-32 Gráfico de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo- 3cargas com óleo limpo

Observa-se nos gráficos da figura 7-32 um nível de vibração muito mais elevado para a condição limpa do que aqueles observados nas condições contaminadas. No entanto, a ordem de grandeza da diminuição identificada é bastante superior àquelas observadas nas duas fases anteriores, quando comparadas à da primeira fase, talvez devido à agitação a que foi submetida o banho nesta fase experimental.

A seguir, será mostrado o gráfico da figura 7-30, onde se exclui a condição sem contaminante, e tendo no eixo das ordenadas o limite do RMS estabelecido em 0,1 mm²/s. Dessa forma poderemos observar melhor como se deu o comportamento dos sinais em função dos diversos níveis de contaminação que foram aplicados.

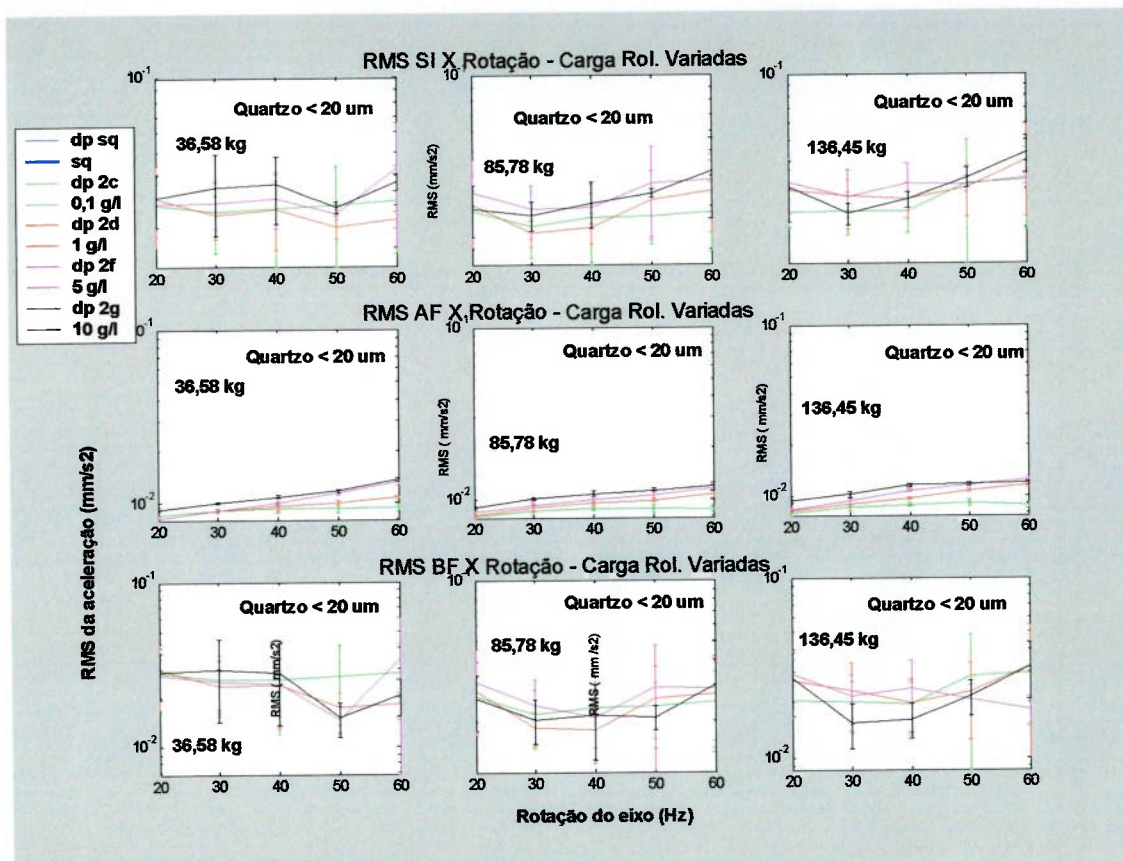


Figura 7-33 Gráfico de RMS SI, AF e BF X rotação do eixo -3 cargas sem óleo limpo

Percebe-se através do gráfico da figura 7-33. um comportamento bastante diverso do alinhamento dos resultados quando se compara o RMS SI e os RMS AF e RMS BF. No entanto, quando analisamos o comportamento em altas frequências, o comportamento de alinhamento da concentração parece seguir uma certa padronização.

A seguir, serão apresentados os três gráficos referentes à filtragem do RMS em altas frequências. A ordenada que corresponde ao RMS do sinal em alta frequência foi fixada em 0,015 mm²/s para todos os três carregamentos.

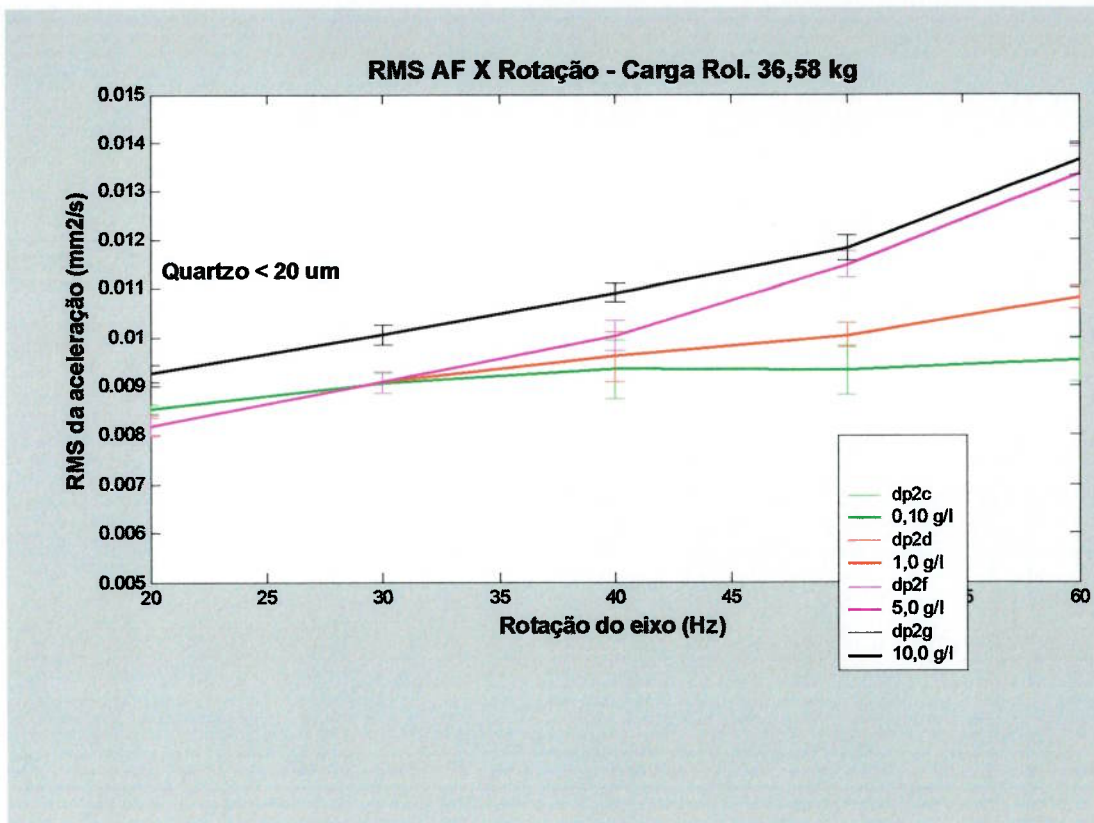


Figura 7-34 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg

Avaliando-se o gráfico da figura 7-34, referente ao carregamento de 36,58 kg, observa-se que para baixas frequências de rotação os valores do RMS da aceleração não se diferenciam muito entre si. Entretanto, a partir da frequência de rotação de 40 Hz, consegue-se observar valores bem distintos para o RMS em cada condição de contaminação, sendo essa característica fica mais evidente ainda para a frequência de rotação de 60 Hz. Nas frequências de rotação mais altas, os valores de RMS da aceleração se posicionam perfeitamente alinhados, acompanhando a ordem de magnitude das concentrações de contaminante utilizadas

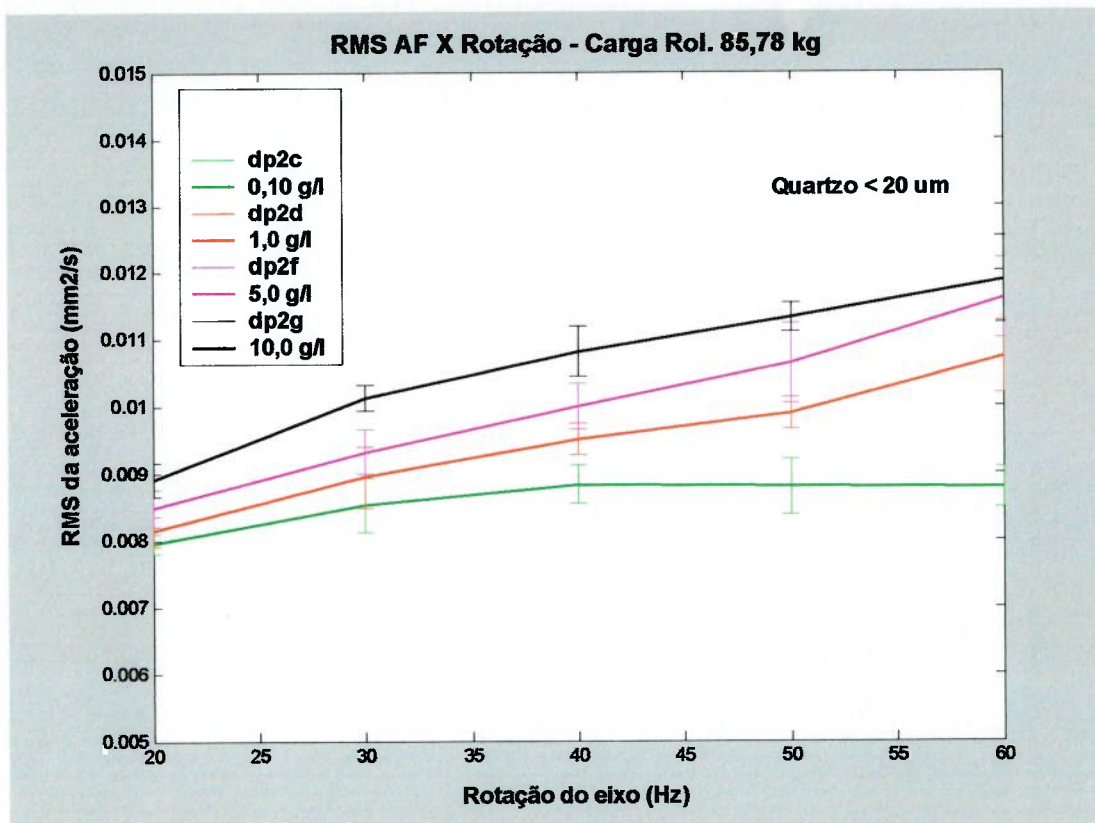


Figura 7-35 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg

O gráfico da figura 7-35, referente ao carregamento de 85,78 kg o alinhamento da concentração do contaminante com os valores de RMS AF é observado para todas as cinco frequências de velocidade de rotação. Entretanto, para as frequências de 20, 50 e 60 Hz, observamos alguma sobreposição entre os valores de desvio padrão, algo que não ocorreu para as frequências de 30 e 40 Hz. Analisado de uma forma geral, a tendência ao alinhamento concentração de contaminante – RMS AF foi estabelecida adequadamente para este carregamento.

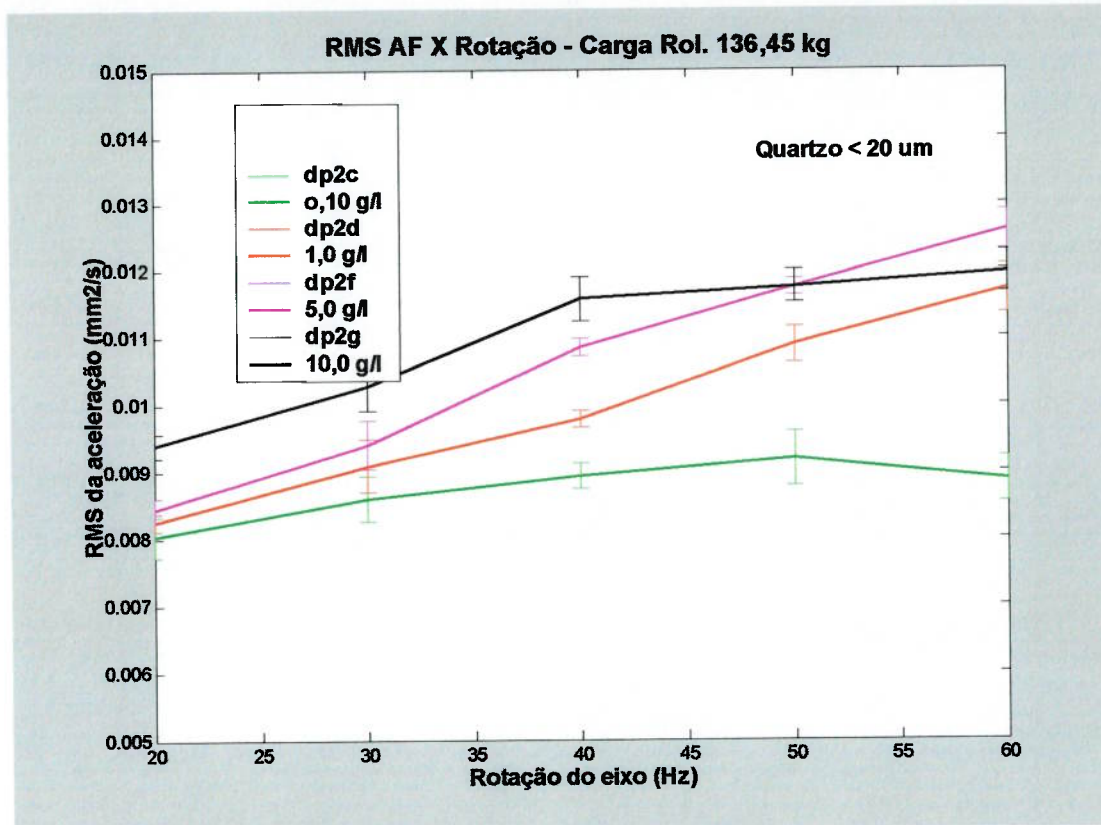


Figura 7-36 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg

O gráfico da figura 7-36 apresenta os valores do RMS em alta frequência que acompanha a tendência de alinhamento observada para os dois carregamentos anteriores. A exceção se dá para os resultados em 50 e 60 Hz, onde as tendências para as condições de 5,0 e 10,0 g/l se invertem.

Constata-se que de um modo geral, observando o comportamento dos gráficos das figuras 3-34, 7-35 e 7-36, os mesmos mostram um ordenamento concentração do contaminante com os valores de RMS AF, sendo este fato bem caracterizado para os três carregamentos utilizados.

7.4.2. Discussão dos resultados

Através da análise dos resultados desta condição experimental, na qual ficou evidenciada a ocorrência de uma grande diminuição dos valores de RMS para as condições contaminadas.

Analisando a figura 7-37, retirada de Allan (1964) pode-se ter uma idéia do comportamento dinâmico de um rolamento quando o mesmo encontra-se radialmente carregado.

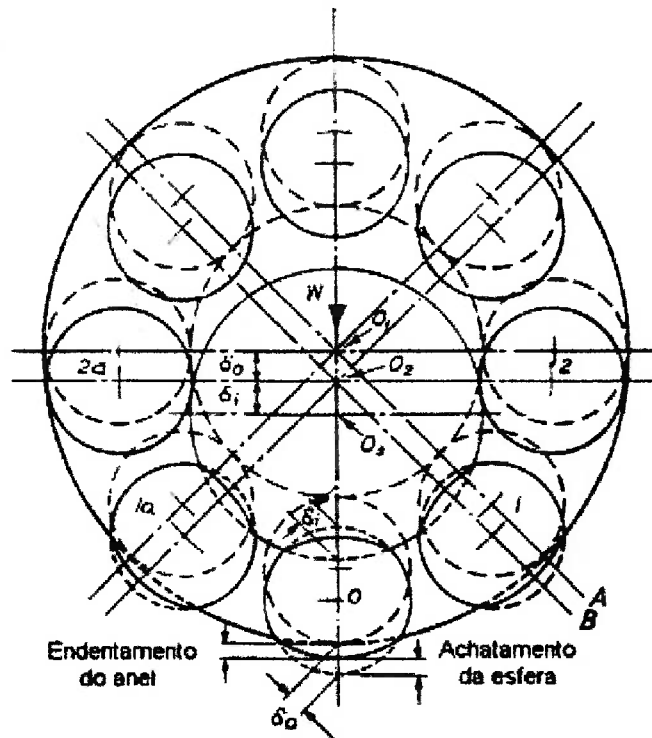


Figura 7-37. Endentamento de anel e achatamento de esfera devido a aplicação de carga radial (Allan, 1964) * adaptado e traduzido pelo autor

Rolamentos radialmente carregados, apresentam o comportamento cíclico de comprimir as esferas da zona de carga junto a pista externa, ao passo que as esferas que não participam do carregamento ficam rodando descarregadas na face oposta do rolamento. As esferas carregadas trabalham achatadas junto à pista, praticamente separadas da pista pela espessura do filme lubrificante. A informação da vibração do rolamento costuma ser uma mistura da energia advinda da zona de carga com a energia produzida pelas esferas que giram descarregadas.

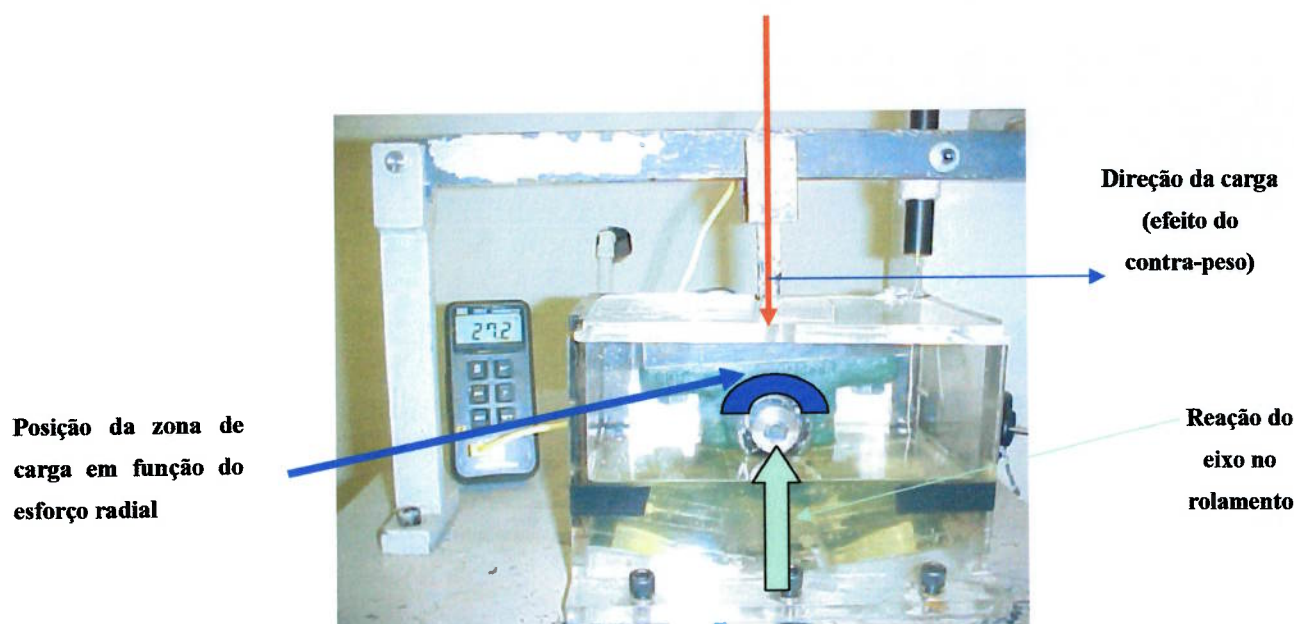


Figura 7-38. Posição da zona de carga do rolamento no mancal de teste

Sendo assim, uma das hipóteses que podem ser admitidas e que expliquem valores menores de RMS para os óleos contaminados, é supor que a agitação contínua do banho tenha depositado **mais** partículas na pista do rolamento e amortecido suas vibrações. Trata-se apenas de uma hipótese, admitida para o rolamento de teste representado pela figura 7-38, sem nenhuma comprovação científica desse fato.

Concluindo os comentários para esta faixa de tamanho de contaminantes, podemos registrar que boas correlações envolvendo RMS AF e concentração do contaminante foram encontradas, para os três carregamentos testados..

7.4.3. Óleos sem contaminantes e com contaminantes entre 75 e 53 μm

Os próximos resultados reportados nesta fase de experiências, referem-se a contaminantes com tamanho entre 75 e 53 μm . Da mesma forma que no item anterior, foram preparadas quatro amostras, referentes as condições “7c, 7d, 7f e 7g”, segundo tabela 6-3. As amostras foram preparadas com:

- 0,10 g/l de quartzo entre 75 e 53 μm , discriminada como condição experimental “7c”;
- 1,0 g/l de quartzo entre 75 e 53 μm , discriminada como condição experimental “7d”;

- 5,0 g/l de quartzo entre 75 e 53 μm , discriminada como condição experimental “7f”;
- 10,0 g/l de quartzo entre 75 e 53 μm , discriminada como condição experimental “7g”.

O gráfico da figura 7-39 refere-se aos resultados dessas aquisições.

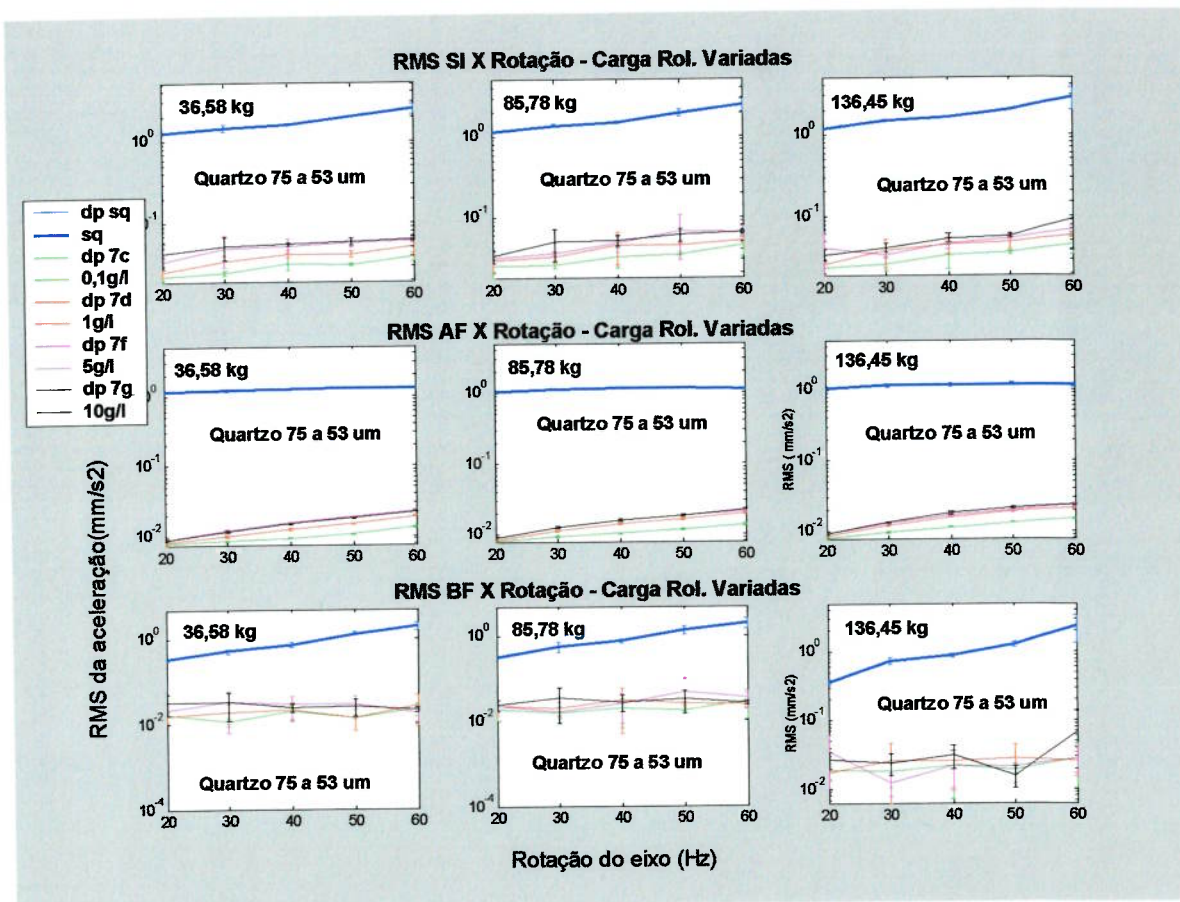


Figura 7-39 Gráfico de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo – 3 cargas, com óleo limpo

Assim como observado com as partículas de tamanhos menores, observou-se pelo análise do gráfico da figura 7-39 que o RMS para a condição de óleo limpo é bem superior aos das condições contaminadas.

A figura 7-40 refere-se ao mesmo gráfico anterior, excluindo-se a condição sem contaminante, e com um valor de ordenada referente ao RMS da aceleração fixado em 0,1 mm^2/s .

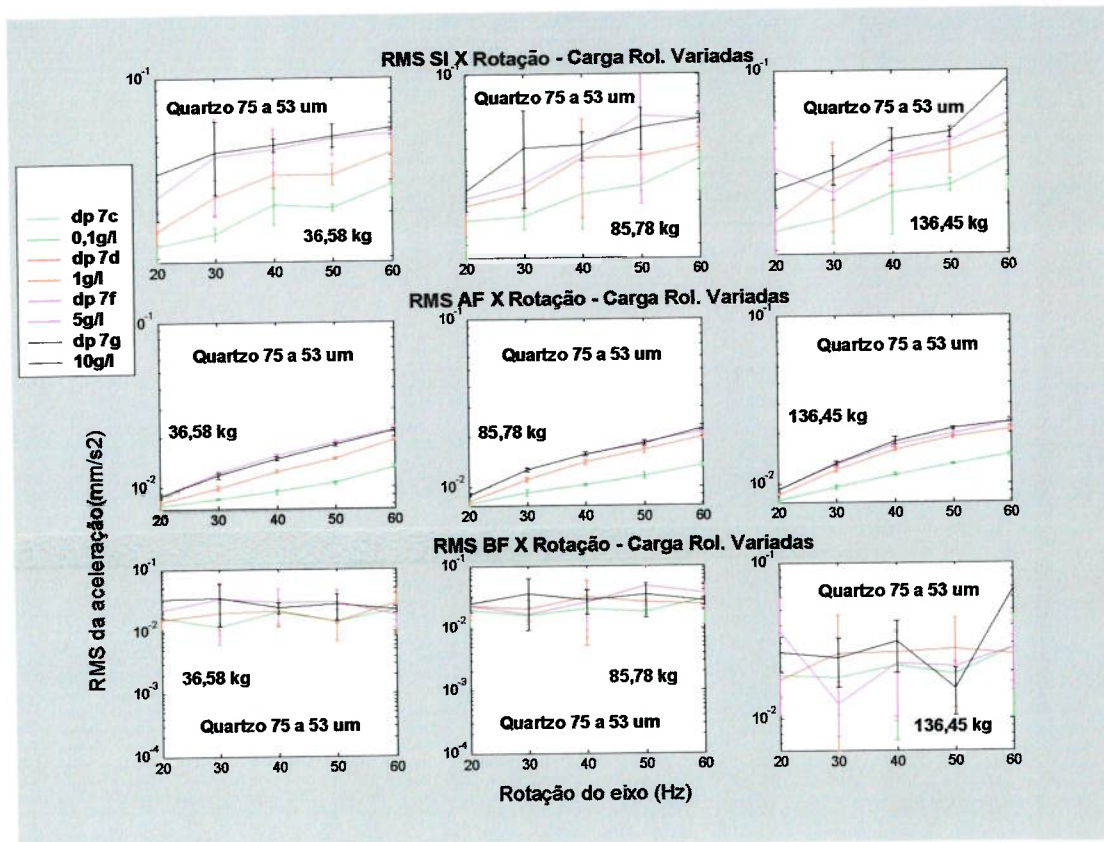


Figura 7-40 Gráfico de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo – 3 cargas, sem óleo limpo

Observando-se o gráfico da figura 7-40, para algumas cargas, observa-se uma certa tendência ao ordenamento da concentração com o RMS tanto do RMS SI como para o RMS AF. Não se constatou o mesmo nos valores de RMS BF, que apresentou resultados inconsistente e sem repetibilidade para os três carregamentos utilizados. Entretanto, percebe-se um comportamento bastante ordenado para os gráficos de alta frequência, razão pela qual os mesmos serão mostrados em detalhes a seguir.

A ordenada que corresponde ao RMS do sinal em alta frequência foi fixada em 0,03 mm²/s para todos os três carregamentos.

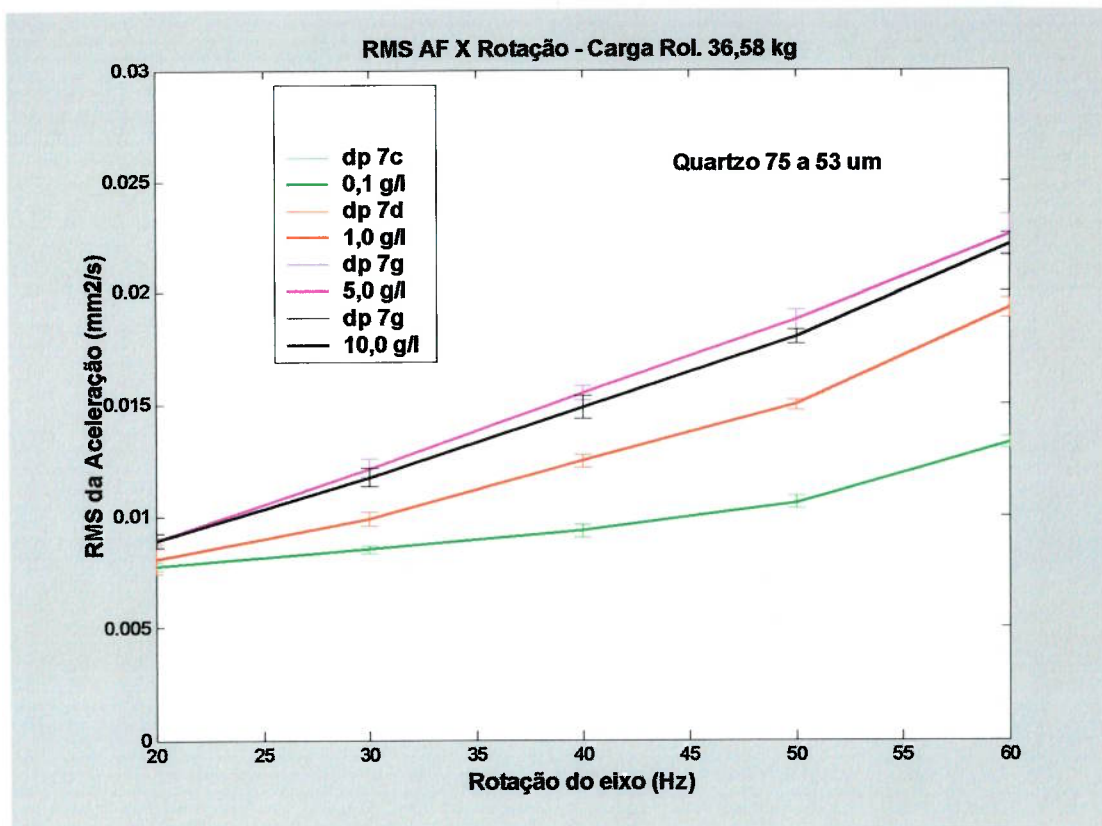


Figura 7-41 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg

Avaliando-se o gráfico da figura 7-41, referente ao carregamento de 36,58 kg, observa-se que para baixas frequências de rotação os valores do RMS da aceleração apresentam diferenciação, porém com alguns cruzamentos de valores de desvio padrão. Entretanto, da mesma forma que na experiência com partículas entre 0 e 20 μm , a partir da frequência de rotação de 40 Hz, consegue-se observar valores bem distintos para o RMS em cada condição de contaminação. Na condição de frequência de 60 Hz, fica bastante claro a diferenciação entre as concentrações de 0,1 e 1 g/l, ao passo que 5,0 e 10,0 g/l têm seus valores de desvio padrão interseccionados. Comparativamente aos outros gráficos de RMS gerados, pode-se dizer que nesta faixa de frequência e nesse carregamento é possível avaliar adequadamente a contaminação no óleo pelo comportamento do RMS AF.

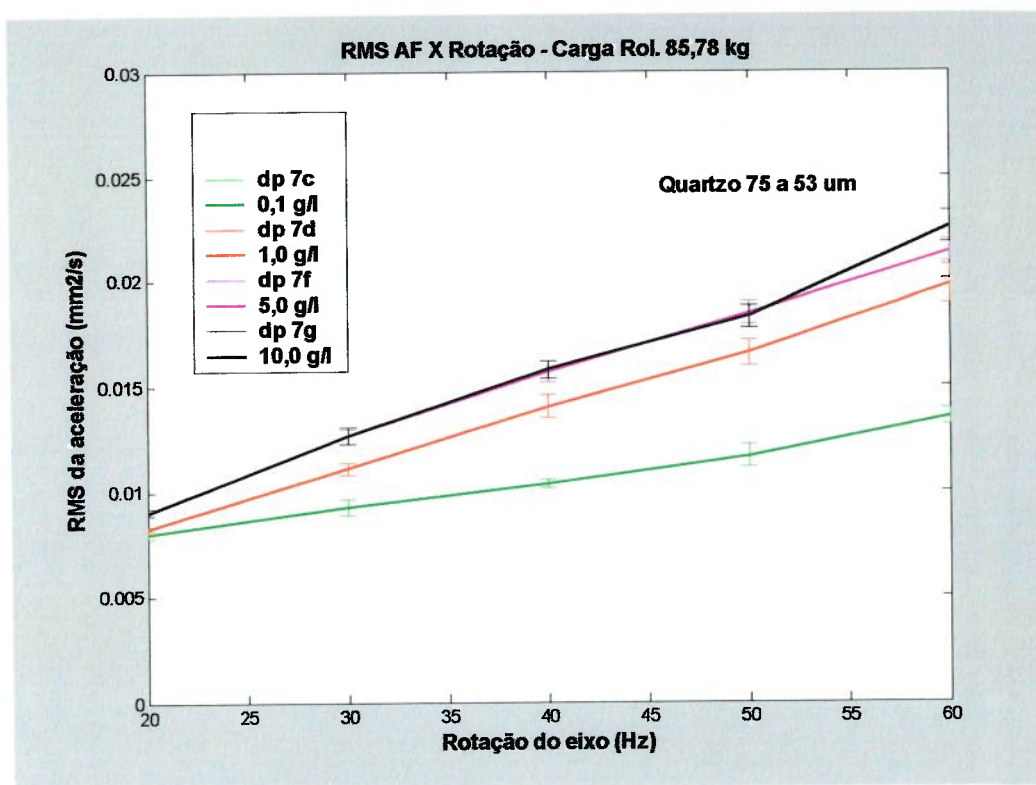


Figura 7-42 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg

O gráfico da figura 7-42, referente ao carregamento de 85,78 kg, observa-se que para a frequência de rotação de 20 Hz, os valores de RMS AF se diferenciam porém com faixas de desvio padrão cruzadas. Entretanto, a partir da frequência de rotação de 30 Hz, consegue-se observar valores bem distintos para o RMS AF em cada condição de contaminação, sendo essa característica mais evidenciado ainda para a frequência de rotação de 60 Hz. Também aqui, apesar dos valores de RMS AF se posicionarem adequadamente alinhados, os valores referentes as condições de 5,0 e 10,0 g/l apresentam-se muito parecidos. Apenas a condição de 0,1 g/l é mantida isolada e facilmente diferenciada das demais condições testadas

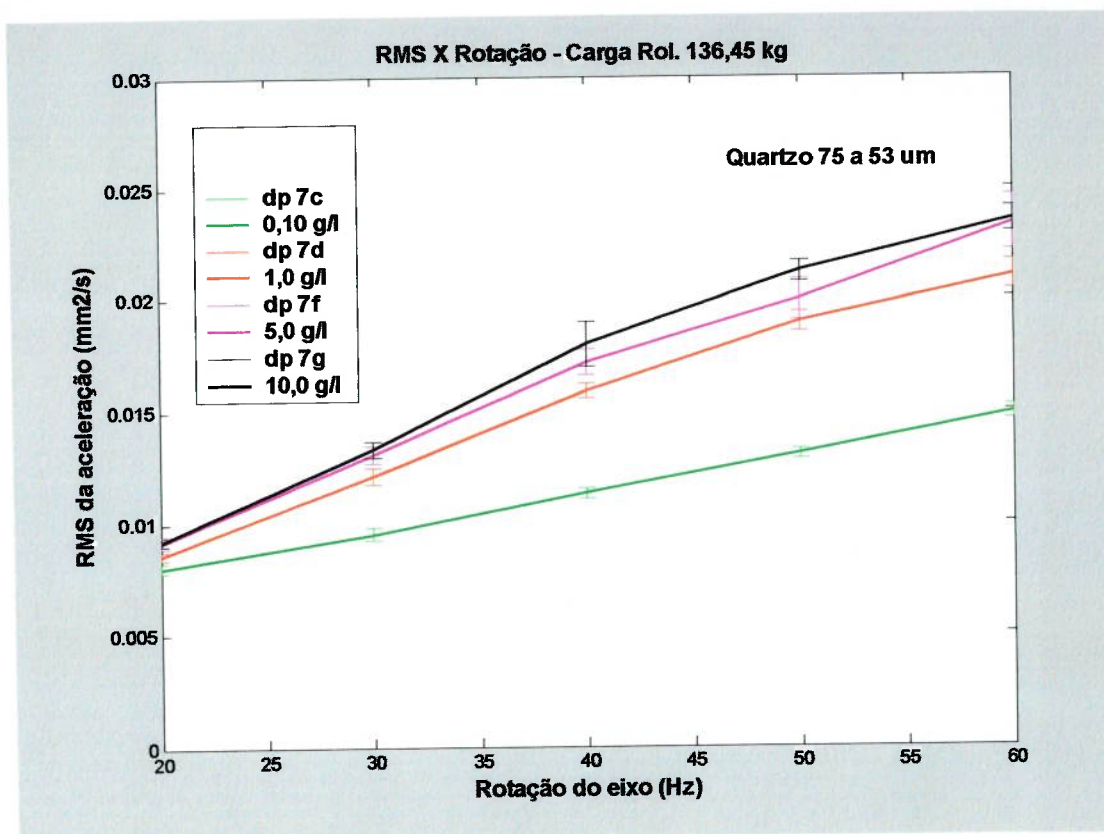


Figura 7-43. Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg

O gráfico da figura 7-43 registra o comportamento do RMS AF e acompanha em parte a tendência observada para os dois carregamentos anteriores, que é a de um alinhamento diferenciado para cada concentração testada. Também aqui, para todas as frequências avaliadas, os resultados de desvio padrão referentes as condições de 5,0 e 10,0 g/l se interseptam. Apenas a condição de menor taxa de contaminação, chamada de “7c” ou 0,1 g/l se mantém diferenciadas das demais, apresentando também aqui o menor valor comparativo entre todas as condições.

7.4.4. Discussão dos resultados

Também para este tamanho de contaminante evidenciou-se uma significativa diminuição dos valores de RMS de óleos contaminados, comparativamente ao dos óleos limpos. Boas correlações envolvendo RMS AF e concentração do contaminante foram encontradas, para os três carregamentos testados.

Pela análise dos resultados, principalmente através dos gráficos de RMS AF, pôde-se constatar excelente possibilidade de se avaliar a concentração da

contaminação no óleo através da análise dos valores do RMS AF, sendo possível de evidenciar um ordenamento adequado das concentrações, bem caracterizado para os três carregamentos utilizados.

7.4.5. Avaliação do comportamento da carga radial: partículas menores que 20 μm e na faixa entre 75 e 53 μm .

Nesta parte do trabalho foram avaliados os efeitos dos carregamentos nas assinaturas dos sinais de vibração. Os resultados obtidos foram dispostos através dos gráficos das figuras 7-44 e 7-45.

Através do gráfico da figura 7-44 fica evidenciado a inexistência de correlação entre a carga radial aplicada no rolamento e os valores de RMS, em qualquer faixa de frequência de rotação e níveis de rotação. Decididamente o parâmetro carga radial neste experimentou não apresentou influência no comportamento dos sinais.

Os resultados em parte se assemelham com aqueles observados na primeira fase experimental (óleo sem contaminantes), onde foi constatado que a carga influenciava pouco nos valores do RMS.

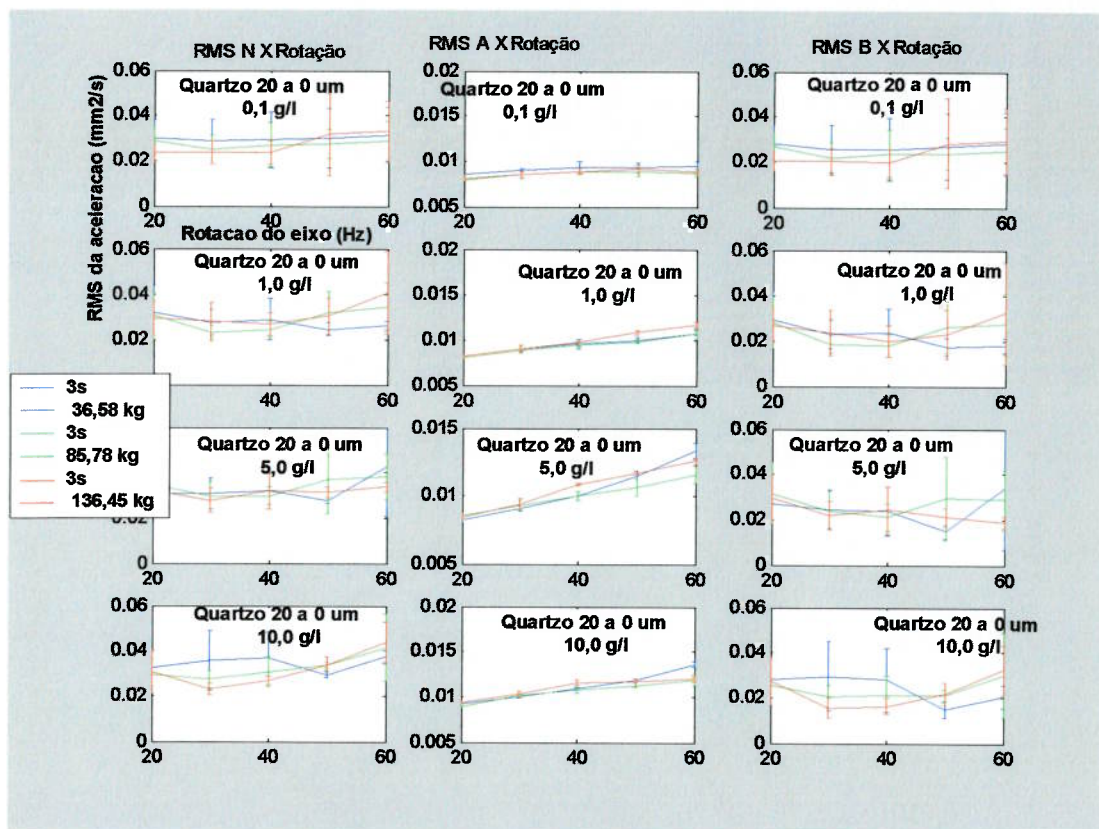


Figura 7-44 Gráfico de RMS SI, AF e BF X rotação do eixo, contaminantes entre 0 e 20 um com concentração conhecida – efeito da carga

Observando-se o gráfico da figura 7-45, verifica-se que também para este tamanho de contaminante observou-se pequena influência da carga radial na assinatura dos sinais de vibrações, comportamento que não variou muito em relação aos tipos de RMS da aceleração que foram calculados.

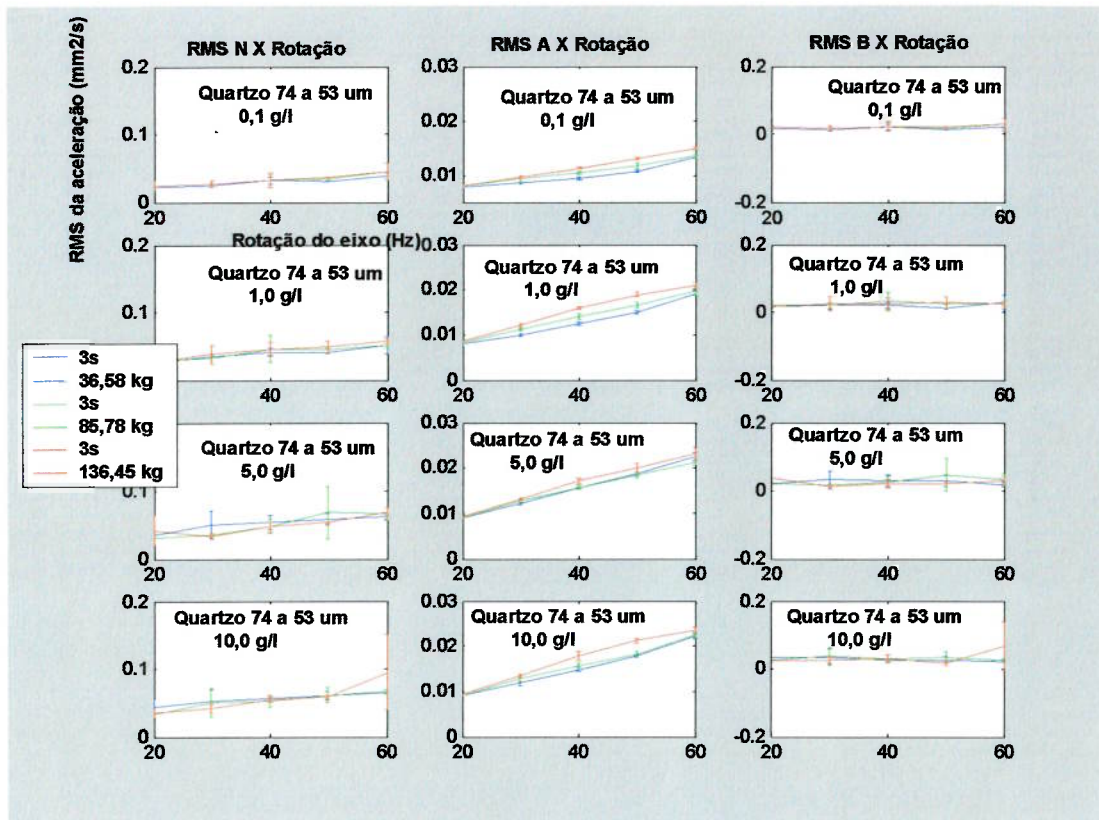


Figura 7-45 Gráfico de RMS SI, AF e BF X rotação do eixo, contaminantes entre 75 e 53 um com concentração conhecida – efeito da carga

7.5. Avaliação das folgas radiais, rugosidades e superfícies

Nesta parte do texto, foram realizadas algumas avaliações comparativas entre um rolamento novo, sem uso, e o rolamento utilizado nos testes após o mesmo ser submetido aos ensaios. A seguir serão mostrados os resultados comparativos, através da avaliação tanto das folgas internas, como da medição das rugosidades, e finalmente os registros visuais das superfícies de trabalho.

7.5.1. Avaliação das folgas internas

Após a realização dos ensaios na bancada, os rolamentos que já tinham tido sua folga radial previamente medida, retornaram ao fabricante para medição dos valores e medição do nível de ruído, através de um aparelho chamado andrômetro. Os resultados são mostrados na tabela 7-13.

Tabela 7-13. Valores de folga interna radial e nível de ruído

Condição Experimental	Folga real antes dos ensaios(μm)	Folga real após os ensaios(μm)	Aumento (%)	Nível de ruído antes dos ensaios	Nível de ruído após os ensaios
	17	28	64	Aprovado	Reprovado

7.5.2. Avaliação das rugosidades superfícies

Da mesma forma que no item anterior, reportados agora os resultados das medições da rugosidades superficiais do rolamento antes e após serem utilizados nos experimentos.

Dois rolamentos, um novo sem uso e outro utilizado nas seqüências experimentais, foram lavados, secos e retornaram ao fabricante. Lá após terem sua folga interna medida (vide item anterior) foram cortados em seis partes iguais, tendo assim tido separados seus anéis, gaiolas e esferas.

As medições de rugosidade foram feitas no rugosímetro do LFS-Poli, da marca Kosakalab, modelo Surfcoorder SE1700 α . Os parâmetros de medições utilizados foram:

- Conforme normas ISO97/JIS2001
- Velocidade: 0,050 mm/s
- Corte: $\lambda_c = 0,080$ mm
- Comprimento 0,400 mm

Os registros das medições encontram-se nos **Anexos 15 a 20**.

A tabela 7-14 mostra os resultados obtidos. Os números obtidos são valores médios que se referem à regiões distintas do mesmo rolamento.

Tabela 7-14. Valores médios de rugosidade medidos após ensaios

	Valores médios de Ra medidos (μm)		
	Médias de 3 ou 4 regiões distintas		
	Esfera	Anel Interno (rotativo)	Anel Externo (Fixo)
Sem Uso	0,0380	0,0416	0,0937
Após ensaio	0,1478	0,1804	0,1791
Aumento aproximado(%)	289,0	333,0	91,0

Através da análise dos resultados da tabela, percebe-se claramente que os efeitos abrasivos das partículas de quartzo são potencialmente mais danosos quando as superfícies giram e provocam uma taxa de riscamento maior. A pista do anel externo do rolamento, que manteve-se fixa durante as experiências, teve sua rugosidade aumentada, porém com uma taxa de aumento bastante inferior a das esferas e da pista interna do anel interno.

No item 6.7.2 havíamos calculado o parâmetro λ com base nas rugosidades teóricas informadas pelo fabricante dos rolamentos. O parâmetro foi teoricamente considerado elasto-hidrodinâmico para todas as quinze seqüências de teste, com λ variando entre 3,1 e 8,0, nas duas conjunções.

O cálculo foi refeito baseado nas rugosidades médias registradas após os ensaios, o que é mostrado na tabela 7-15.

Tabela 7-15. Novos cálculos de λ e regimes de lubrificação

	$h_{i \text{ mín}}$ $h_{o \text{ mín}}$ (μm)	R_a esfera (μm)	R_a Pista Interna (μm)	R_a Pista Externa (μm)	Novo Cálculo λ (real)	Avaliação
Conjunção Esfera – Pista Interna - Mín	0,29718	0,1478	0,1804	-	1,27	Misto ou Limite
Conjunção Esfera – Pista Interna - Máx	0,57050	0,1478	0,1804	-	2,45	Misto ou Limite
Conjunção Esfera – Pista Externa - Mín	0,35805	0,1478	-	0,1791	1,54	Misto ou Limite
Conjunção Esfera – Pista Externa – Máx.	0,68737	0,1478	-	0,1791	2,96	Misto ou Limite

Nota-se que teoricamente houve a possibilidade da ocorrência de uma alteração no regime de lubrificação. Esta ocorrência que teria sido provocada pelos experimentos será avaliada e investigada no item 7.6, através dos resultados das análise dos resíduos de desgaste nas amostras de óleo utilizadas.

Apesar de apenas a seqüência mais severa ter sido analisada, é bastante possível aceitar que os mesmos fenômenos tenham ocorrido pra a condição entre 0 e 20 μm .

7.5.3. Avaliação das superfícies

Inicialmente mostraremos a superfície das esferas de um rolamento sem uso e as esferas de um outro rolamento submetido às condições experimentais com contaminação por quartzo.



Figura 7-46. Fotos de esferas dos rolamentos

Analisando-se as fotos apresentadas na figura 7-46, percebe-se uma coloração diferenciada da esfera submetida aos ensaios, com aparência mais opaca e sem brilho, ocasionada pelo trabalho da esfera em meio lubrificante com contaminação de origem sólida.


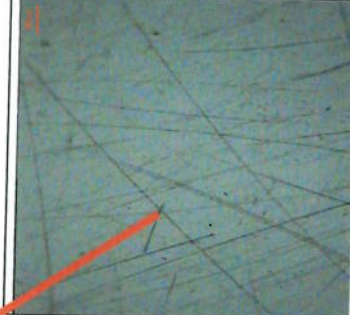
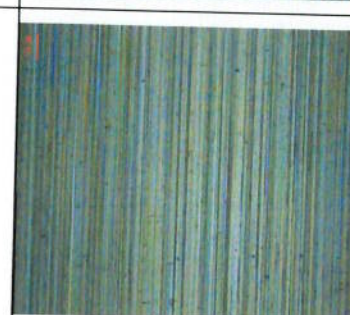

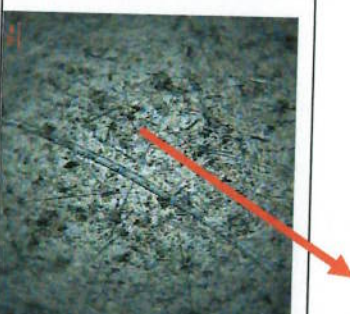
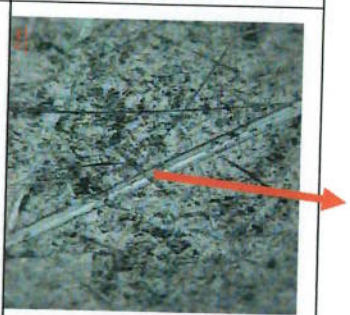
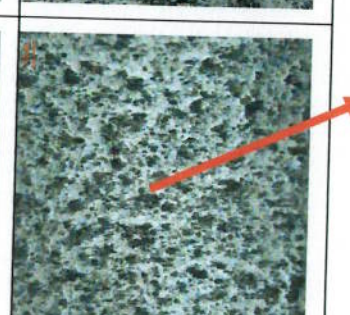
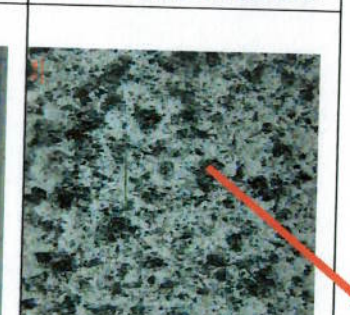
A esfera correspondente ao rolamento novo, sem uso, apresenta brilho e aparência lapidada.

É possível identificar claramente os efeitos abrasivos dos cristais de quartzo nas superfícies das esferas que trabalharam em óleos sem e com a presença de contaminantes.

As micro-fotos mostradas na tabela 7-16 referem-se a superfícies de esferas e pistas internas do anel interno e pistas internas do anel externo, de um rolamento sem uso e do rolamento testado após as duas condições experimentais, analisadas em microscópio e aumentadas de 100 e 200 vezes.

Tabela 7-16. Micro fotos das esferas e pistas do rolamento

Riscos por manipulação pós polimento

	Esfera	Pista do Anel Interno	Pista do Anel Externo	Idem
	Aumento 100 X	Aumento 100 X	Aumento 100 X	Aumento 200 X
Sem uso				
Após ensaios				

Próváveis óxidos escuros advindos da oxidação do óleo

Provável risco devido a abrasão do quartzo

Prováveis marcas de desgaste oxidativo (superfícies que giraram)

Marcas de desgaste de superfície mantida fixa (deslizamento)

Riscos originais de usinagem

Em relação às micro-fotos dos componentes sem uso, registraremos algumas observações. Para os componentes sem uso destacamos:

- Esferas sem uso: apesar das superfícies serem originariamente lapidadas e isentas de riscos, é possível que a manipulação tenha ocasionado riscos superficiais;
- A região das pistas internas e pistas externas sem uso aparentemente apresentaram-se preservadas;

Para os componentes com uso destacamos as seguintes constatações:

- Nas esferas, que trabalharam girando tanto com folga equivalente ao filme de óleo como isentas de contato na zona descarregada, foram observadas as presenças de marcas que lembram mecanismos de desgaste oxidativo (não comprovadas por análises complementares), provavelmente ocasionadas pelos cristais de quartzo, além de óxidos escuros que provavelmente foram originados dos efeitos de oxidação das moléculas do óleo (isento de qualquer aditivção) nos contatos;
- Já nas pistas do anel interno, que tiveram cargas rotativas aplicadas enquanto giravam, as marcas desses prováveis alojamentos de óxidos foram ainda mais evidenciadas, tornando a superfície com um efeito que lembra a figura e uma “couve-flor”. Os efeitos da oxidação do óleo também são muito evidentes e estão bem caracterizados;
- Já as pistas do anel externo também apresentaram significativas alterações em suas superfícies, porém o grau de desgaste observado foi muito menor que o da pista interna, uma vez que este anel permaneceu fixo durante os experimentos.

7.6. Resultados das análise de resíduos de desgaste nos óleos

Nesta última parte do texto que envolve as avaliações da experiência, foram realizadas para algumas seqüências, ensaios de resíduos de desgaste nos óleos lubrificantes utilizados. Com isso, poderão ser melhor avaliadas algumas das hipóteses levantadas anteriormente.

As amostras de óleos de todas as concentrações ensaiadas, uma vez concluída a aquisição de dados, foram coletadas em frascos e enviadas ao laboratório Tribolab

para análise. As amostras de todas as concentrações foram submetidas a ensaios de espectrometria. Apenas as amostras das duas condições de maior concentração, a “2g” e a “7g”, com cerca de 10 g/l de quartzo cada, avaliadas como as condições onde foram impostas uma maior severidade aos contatos, é que foram submetidas às análises complementares de ferrografia quantitativa e analítica

Em função da quantidade de contaminante adicionada ao banho, a expectativa era que esse tipo de análise não só reportasse a contaminação, como também a partir de técnicas especiais de filtragem e ataque de superfícies, pudesse informar a forma e o tamanho das partículas de desgaste encontradas nos ferrogramas.

A seguir serão mostrados os resultados, seguido de comentários e observações, dos resultados de ensaios envolvendo as técnicas de espectrometria (detecção de partículas < 15 µm), ferrografia quantitativa e ferrografia analítica.

7.6.1. Resultados dos ensaios de espectrometria

. Os resultados dos principais metais de desgaste e contaminação são mostrados na tabela 7-17.

Tabela 7-17. Valores dos metais no óleo através de espectrometria

Condição Experimental	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Sn (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Demais metais de desgaste (ppm)	
Óleo Novo (Filtrado)	0	0	1	0	0	0	0	
Óleo de amaciamento	0	0	0	0	0	0	0	
Sem Contaminante	0	0	0	0	0	0	0	
Quartzo < 20 µm	2c 0,1 g/l	1	0	0	1	0	2	0
	2d 1,0 g/l	2	0	1	1	0	5	0
	2f 5,0 g/l	12	0	1	0	2	64	0
	2g 10,0 g/l	23	0	0	0	5	128	0
Quartzo entre 75 e 53 µm	7c 0,1 g/l	5	0	1	1	0	10	0
	7d 1,0 g/l	9	0	1	0	0	11	0
	7f 5,0 g/l	30	0	0	0	0	29	0
	7g 10,0 g/l	53	1	0	0	1	55	0

Os laudos com os resultados das análises encontram-se nos Anexos 21 a 31.

A fim de acompanhar a evolução dos valores, mostraremos os resultados na forma de dois gráficos, representados pelas figuras 7-47 e 7-48.

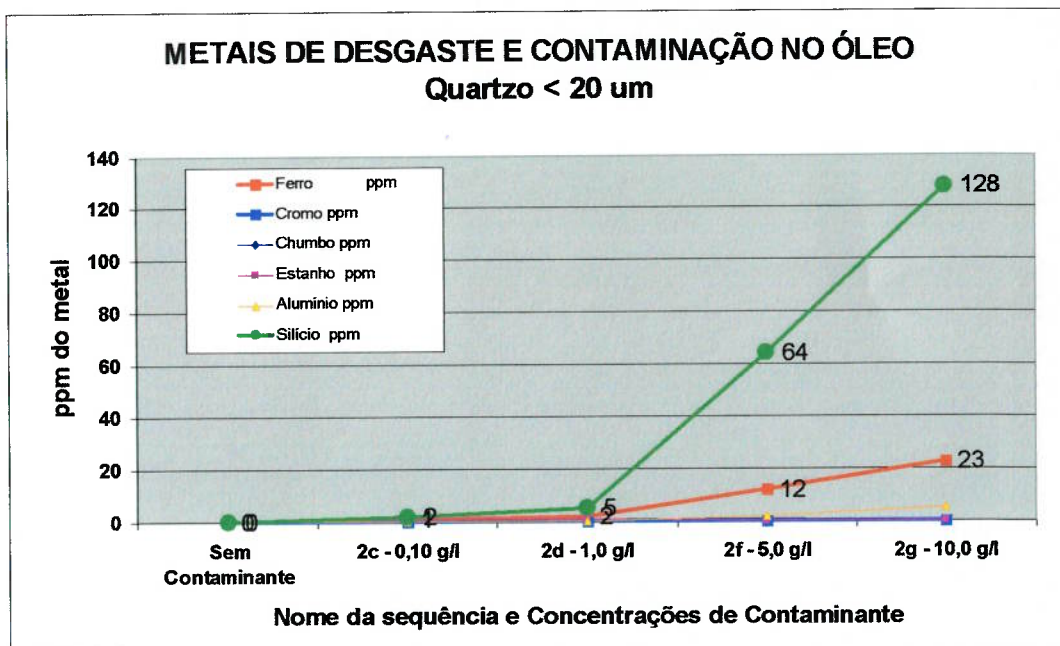


Figura 7-47. Gráfico de metais no óleo por espectrometria – condição “2g”

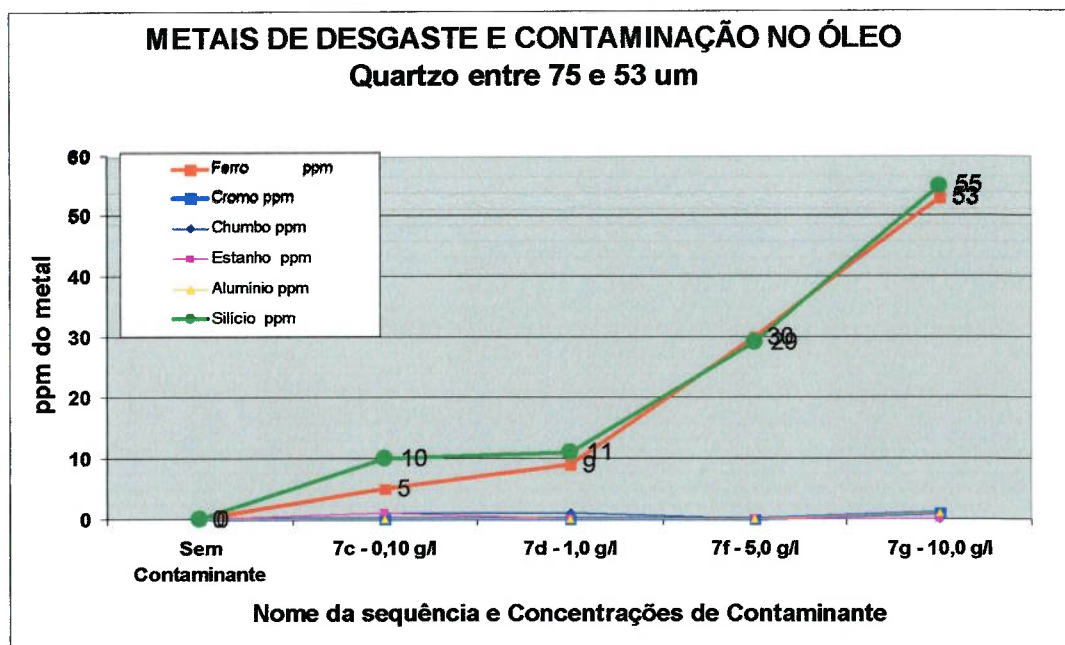


Figura 7-48. Gráfico de metais no óleo por espectrometria – condição “7g”

Através da análise dos gráficos das figuras 7-47 e 7-48, podemos observar que os teores do metal de desgaste ferro e do contaminante silício evoluíram a medida que se aumenta a concentração do contaminante. Entretanto essa evolução se mostrou diferenciada para cada faixa de contaminante. Ao passo que para contaminantes na faixa menor que 20 μm (diâmetro médio de 16 μm pelo método de espalhamento de laser) o teor de silício na condição “2g” com 10 g/l atingiu o valor de 128 ppm, para a condição “7g” com quartzo na faixa entre 75 e 53 μm (diâmetro médio de 86 μm pela técnicas de espalhamento do laser), o teor de silício atingiu apenas 55 ppm. Isto pode ser explicado tanto pela característica de medição do aparelho, ou seja, a espectometria mediu preferencialmente as partículas que tinham tamanho menor entre os dois banhos, no caso as partículas da condição “2g”. A própria estrutura molecular do quartzo, caracterizada pela grande distância entre seus átomos favorece no caso da espectometria, a medição de partículas de menor tamanho em detrimento as de maior tamanho.

No caso dos metais de desgaste foi observado um outro comportamento. Apenas o metal ferro apresentou variação significativa. Percebe-se entretanto que para o metal de desgaste ferro, o tamanho maior de contaminante foi responsável por uma perda de massa maior desse metal, confirmando a referência bibliográfica de Fitzsimmons, Clevenger (1975) citada no item 3.1, a qual coloca que desgastes em rolamentos “tendem a ser mais severos proporcionalmente ao tamanho do contaminante”. Esses dados foram confirmados pelos ensaios de ferrografia analítica, que em seguida serão apresentados.

7.6.1. Resultados dos ensaios de ferrografia

A seguir serão reportados os principais resultados obtidos pelas exames das ferrografias quantitativa e analítica.

O laudo da condição “2g” que refere-se as partículas de quartzo < 20 μm numa concentração de 10,0 g/l indicou:

- Valores de ferrografia quantitativa não puderem ser usados como parâmetro devido a excessiva contaminação da amostra. Na verdade, houve grande decantação de partículas antes das mesmas adentrarem ao ferrograma;

- Identificada as presenças de partículas ferrosas geradas por esfoliação com tamanho médio de 6 μm ;
- Pequenos sinais de *pitting*, identificado por partículas laminares de até 30 μm ;
- Óxidos de ferro sinalizando rompimento de filme lubrificante, conforme já havia sido previsto no item anterior;
- Abrasão causada por grande quantidade de contaminantes;
- Cristais de quartzo com tamanho médio de 20 μm , sugerindo que 90 % do volume inicial de contaminante que tinha diâmetro de cerca de 27 μm , sofreram uma redução de tamanho de cerca de 26 %;

A conclusão geral do ensaio é a de provável ocorrência de desgaste no rolamento com pequeno rompimento de filme lubrificante.

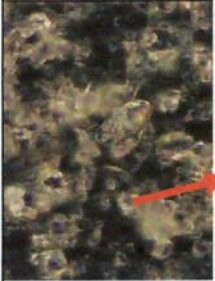
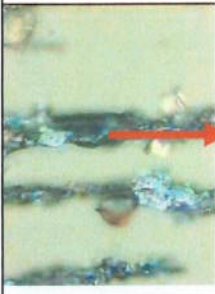



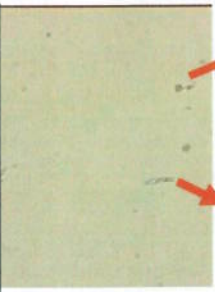
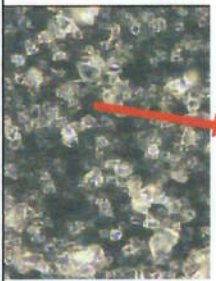
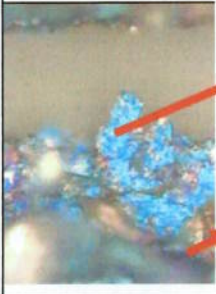
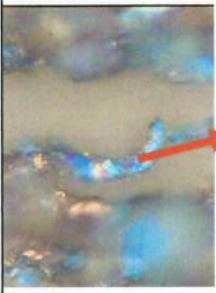
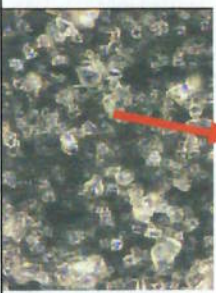


O laudo da condição “7g” que refere-se as partículas de quartzo entre 75 e 53 μm numa concentração de 10,0 g/l indicou um resultado muito parecido com a condição “2g”, a saber:

- Valores de ferrografia quantitativa não puderem ser usados como parâmetro devido a excessiva contaminação da amostra;
- Identificada as presenças de partículas ferrosas geradas por esfoliação com tamanho médio de 6 μm ;
- Maior presença de sinais de *pitting*, identificado por partículas laminares de até 20 μm ;
- Óxidos de ferro sinalizando rompimento de filme lubrificante, conforme já havia sido previsto no item anterior;
- Cristais de quartzo com tamanho médio de 25 μm , sugerindo que 90 % do volume inicial de contaminante que tinha diâmetro de cerca de 120 μm , sofreram uma redução de tamanho de cerca de 80 %;

A conclusão geral do ensaio é a de provável ocorrência de pequena presença de *pitting* no rolamento, sem falha iminente, com a recomendação de manutenção de “apenas” tratar o óleo lubrificante.

A seguir serão mostradas através da tabela 7-18 alguns ferrogramas obtidos pela técnica de ferrografia analítica.

Tabela 7-18. Principais fotos dos ferrogramas das condições "2g" e "7g"

	1. Visão Geral Ferrograma	2. Detalhe de Óxidos Escuros	3. Partícula de Abrasão	4. Ferrograma com quartzo expurgado	5. Óxidos Vermelhos	6. Pequenas part. ferrosas < 0,5 µm
Quartzo < 20 µm	Aumento 500 X  população de cristais de quartzo (uso de filtro)	Aumento 500 X  óxidos escuro (rompimento de filme)	Aumento 1000 X  partícula de abrasão	Aumento 100 X  cristais de quartzo (com aumento)	Aumento 500 X  partícula de óxido vermelho (rompimento parcial de filme)	Aumento 1000 X  part. de esfoliação part. de quartzo
Quartzo entre 75 e 53 µm	Aumento 500 X  população de cristais de quartzo (uso de filtro)	Aumento 1000 X  óxido escuro esfoliação	Aumento 1000 X  partícula de abrasão	Aumento 500 X  cristais de quartzo (sem expurgo)	Aumento 500 X  óxido vermelho (romp. parcial de filme)	Aumento 1000 X  part. de esfoliação part. de quartzo

Em relação as ferrografias realizadas, algumas observações foram realizadas. A visão geral do ferrograma, para as duas condições de contaminação acompanhou a tendência que já havia sido observada nas micro-fotos, a saber:

- A ocorrência de cominuição ou tritramento das partículas de quartzo ficou bem caracterizada pela visão geral dos dois ferrogramas;
- A identificação de óxidos escuros e vermelhos nos dois ferrogramas ratifica a hipótese levantada pelos resultados anteriores, que sugeriam a hipótese de ocorrência de rompimento de filme durante os ensaios. A presença de óxidos escuro também evidencia o fato da falta de aditivção anti-desgaste nos ensaios, parâmetro imposto aos experimentos;
- Partículas laminares e de abrasão podem ter relação com a ocorrência de possível desgaste oxidativo, ou efeito “couve-flor” (hipótese não confirmada experimentalmente);
- A identificação da presença de micro-partículas inferiores a 0,5 μm , reforçam a idéia de grande ocorrência de grande trituração nos contatos;
- Percebe-se também através desta técnica que entre as duas concentrações testadas, **o tamanho maior de contaminante foi responsável por uma maior taxa de esfoliação e partículas laminares**. O resultado obtido, apesar de ocorrer em um ensaio onde a questão do desgaste não foi concebida como objetivo, mas sim como uma decorrência natural, confirma a referência bibliográfica de Fitzsimmons; Clevenger (1975) citada no item. 3.1., a qual coloca que desgastes em rolamentos “tendem a ser mais severos proporcionalmente ao tamanho do contaminante”.

8 CONCLUSÕES

“Devia ter complicado menos.....

Trabalhado menos.....

Ter visto o Sol se pôr.....”

Música: EPITÁFIO

Canta : Titãs

Os resultados experimentais indicaram as seguintes conclusões para a finalização deste trabalho:

- Cargas radiais variam proporcionalmente e com ordem de grandeza variável com os valores de RMS,
- Os valores de RMS em rolamentos aumentam à medida que se eleva a frequência de rotação do eixo;
- É possível diferenciar perfeitamente, através do RMS, as condições de lubrificação por óleo limpo e sujo, quaisquer que sejam a condição suja;
- Em banhos de óleo monitorados por contador de partículas óptico, baixa correlação entre nível ISO 4406 de contaminação e RMS da aceleração foram encontradas;
- Variação proporcional entre tamanho de contaminante e valores de RMS SI foram identificadas, para todos os tamanhos avaliados nas experiências;
- Correlação parciais entre concentração de contaminantes e valores de RMS SI foram identificadas, para todas as concentrações avaliadas. O grau de contaminação prévia do banho interferiu nos resultados, sugerindo que existam limitações para a detecção da concentração através da vibração;

- Quando ensaiou-se com uma condição onde o banho de óleo era agitado, essa correlação evidenciou-se através do RMS AF;
- As faixas de frequência que foram adotadas para as definições dos cálculos de RMS deste conjunto de experiências foram adequadas. Entretanto, deve ser registrado que para os casos onde a avaliação da contaminação por vibrações não ficou bem caracterizada, os mesmos poderiam ter sido constatados mediante uma pesquisa e utilização de uma faixa de frequência do espectro adequada, que contemplasse a informação da contaminação no banho de óleo;
- **É possível avaliar-se a contaminação sólida de lubrificantes de rolamento através da assinatura dos sinais de vibração.**

A adequada definição de como se mede a contaminação sólida em um lubrificante faz parte da metodologia.

Esses resultados confirmam e até extrapolam os resultados apresentados no trabalho de Komiya (1992).

Na parte de análise de superfícies e resíduos de desgaste, foram constatadas as seguintes ocorrências:

- Rolamentos em banho de óleo em condições de contaminantes sólidos com dureza de mesma ordem, mesmo operando por pequeno intervalo de tempo, estão sujeitos a expressivas modificações de folga interna radial, rugosidade bem como alterações visuais nas superfícies das esferas e das pistas. Verificou-se visualmente superfícies marcadas distintas para o anel do rolamento que girou com o eixo e para o anel que permaneceu fixo;
- Operando nas condições acima relatadas, a análise dos resíduos de desgaste por espectrometria apresentaram valores do metal de desgaste ferro diretamente proporcionais ao tamanho médio do contaminante e inversamente proporcional ao metal de contaminação silício. Apesar do experimento não se tratar de um ensaio de desgaste, e sim um ensaio dinâmico de rolamento em banho de óleo contaminado, os resultados reforçam os resultados da experiência de Fitzsimmons, Clevenger (1977)

-
- Valores de ferrografia analítica apontaram condições de desgaste severo para rolamentos operando nessas condições, evidenciando cominuição (tritramento de partículas) e rompimento de filme lubrificante, relacionados com a introdução de meio sólido abrasivo nos contatos. Esses resultados compactuam com as referências utilizadas, Dwyer-Joyce (1993) e Jacobson (2000).
 - É possível admitir também que a alteração significativa dos valores de rugosidade do rolamento tenham ocasionado a alteração no regime de lubrificação. Interessante registrar que mesmo identificando aumento de rugosidade, desgastes e alterações nas superfícies além de rompimento de filme lubrificante, os valores de RMS das condições contaminadas apresentaram-se menores que os das condições “limpas”. Isto sugere a existência de fenômenos de superfície (que foram discutidos no texto) mas não comprovados experimentalmente, relacionados com uma efetiva diminuição dos valores de vibração em rolamentos que operam em condições de contaminação de óleo lubrificante muito elevada.

9 TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se os seguintes pontos não abordados por este trabalho que podem vir a serem continuados no futuro:

- A) Formas distintas de se utilizar a informação de vibração:
 - Avaliar informação em outras bandas de espectro, através de uma análise mais detalhada do conteúdo espectral dos sinais de vibração;
 - Utilizar outros parâmetros estatísticos que não o RMS da vibração;
 - Utilizar envelope do sinal;
 - Utilizar redes neurais para a classificação da contaminação.
- B) Modificação nos parâmetros de ensaio:
 - . Investigar os efeitos dos sinais de vibração comparativamente com baixo e elevado tempo de operação contínua do rolamento;
 - Utilizar um rolamento diferente para cada amostra de óleo, avaliando e correlacionado conjuntamente vibração com os efeitos superficiais no rolamento e nos resíduos de desgaste gerados.
- C) Alterando-se os elementos do ensaio:
 - Utilizar outros tipos de rolamentos, como rolos, autocompensador, axiais;
 - Utilizar outros tipos de contaminantes sólidos, como óxido de ferro, areia comum, latão,
 - Utilizar outros tipos de contaminantes, como água, solventes;
 - Alterar o tipo e viscosidade de óleo lubrificante (sintético, rerefinado);
 - Fazer testes com graxas limpas e contaminadas;
 - Variar o nível de óleo no interior da cuba.

REFERÊNCIAS

ABNT PMB 325 Determinação de Insolúveis em Óleos Lubrificantes Usados

AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA, INC. - NASA
Cleanliness Requirements of Parts Used in Hydraulic Systems - NAS 1638.
Estados Unidos, 1964.

ALMEIDA, M.T.; GÓZ, R.D.S. **Curso de Análise Avançada – Rolamentos e Engrenagens FUPAI**, Itajubá, 1995

ANDERSON, Daniel P. **Wear Particle Atlas**, Advanced Technology Office, Naval Air Engineering Center, USA: Telus, 1982.

ANON. Cost-Effective Oil Analysis Using Proper Sampling Techniques and Standardized Application Programs. **Practical Lubrication and Maintenance**, v.10, n.1, p.19 -22, mar. 1987 .

AZOVTSEV, Y.A.; BARKOV, A.V.; YUDIN, I. A. Automatic Diagnostics and Condition Prediction of Rolling Element Bearing Using Enveloping Methods Disponível em: <http://www.vibrotek.com/articles/new94vi/> Acesso em: 16/06/2003

BALL, P.G. Machine Wear Analysis – A Rational Approach to Methods Integration for Maximum Benefits. **Lubrication Engineering**, v.54, n.3, p.18-22, mar. 1998 .

BARONI, T.A.D., GOMES, G.F. **Ferrografia – Controlando o desgaste das máquinas**, p.1 – 16, Brasil, 2002.

BERG,S. A Study of Sample Withdrawal for Lubricated Systems. Part 1: Influence of Flow Characteristics, Sampling, Techniques and Locations. **Industrial Lubrication and Tribology**, v.53, n.1, p.22 -31, 2001 .

BERRY, J.E. How to Track Rolling Element Bearing Health with Vibration Signature Analysis **Sound and Vibration**, p.24 -35, 1991 .

BLOCH, H.P. In Lub Oil contamination and On-stream Oil Purification, Synthetic Lubricants, Practical Lubrication for Industrial Facilities. Lilburn, USA: Fairmont Press, 2000. 612 p

BOOSER, E.R. In: BOOSER, E.R. **Theory and Practice of Tribology –v.II – Theory and Design**. CRC Handbook of Lubrication: 1984. p. 626.

CAMPBELL, W.S.; IACOPINI, J.. Suction Roll Pilot Bearing Failure Due to Inadequate Lubrication. **Tappi Journal**, v. 77, n.12, p.233-236, dez. 1994.

CARRETEIRO, R.P., MOURA, C.R.S..Óleos Lubrificantes, p. 31-68. In CARRETEIRO, R.P., MOURA, C.R.S.. **Lubrificantes e Lubrificação** São Paulo: Makron Books, 1987.

CLARKE, R.A. Aceites Lubrificantes para Rodamientos. **La Revista de Rodamientos**, v.170, p.26-29, 1972.

DOWSON, D. Elastohydrodynamic and micro-elastohydrodynamic lubrication **Wear**, v.190, n.2, p.125-138, dec. 1995.

DWYER-JOYCE, R.S. **The effects of lubricant contamination on rolling bearing performance. 1993. 238p. Dissertação (Doutorado)** - Department of Mechanical Engineering. Imperial College of Science. London. Micro filme.

ELEFTHERAKIS, J.G.;SHELTON, D.C.; LONG, R. Accurate Assessment of Particle Counts in Liquids. **Lubrication Engineering**, v.51, n.3, p.205-208, mar. 1995.

FITZSIMMONS, B; CAVE, B.J. Lubricant Contaminants and their Effects on Tapered Roller Bearing Performance Wear. **Tribology International** abr1977.

GARVEY, R. Integrating Vibration and Oil Analysis Within Today Disponível em: <http://www.csi.com/articles/> Acesso em: 20/10/2003

GFT-Work sheet n.º 3 Rolling Bearing Lubrication Handbook. **Fuchs Petrolub AG**, p.40-42, 1999.

GLÄNTZ,W. Contamination in Lubrication Systems for Bearings in Industrial Gearboxes. **Ball Bearing Journal** 242, p.20-26, 1992.

GODFREY, D. Recognition and Solutions Some Common Wear Problems Relates to Lubricants and Hydraulic Fluids. **Journal of the American Society of Lubrication Engineers**, p.111-114, 1987.

GODFREY, D. Clean, Dry, Oil Prolongs Life of Lubricated Machines. **Lubrication Engineering**, v.45, n.1, p.4-9, jan. 1989.

GODFREY, D.; Herguth, R, Physical and Chemical Properties of Industrial Mineral Oils Affecting Lubrication. **Lubrication Engineering**, v.52, n.2, p145-148, feb. 1996.

HANROCK, Bernard J. **Lubrication of Machine Elements** NASA Reference Publication; 1126. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1984. 84p.

HAYDEN, H.W.; MOFATT, W.G.;WULFF, J. **The structure and properties of materials. In: Mechanical Behavior**, v.3, 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1967. 247p.

HYDAC, Hydac Filtrertechnik – Contamination Handbook – Prospekt Nr. DEF 7.603.1/12.02, 2002 – Apostila

HUTCHINGS, I.M. Lubricants and Lubrication. In: HUTCHINGS, I.M. **Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials**. United Kingdom: 1992. p 1-58-73.

HYDAC Fluid Control Unit FCU 2010/2110 , fev 2002 Hydac International , Alemanha, Folheto Técnico

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Hydraulic Fluid Power – Fluids – Method for Coding Level of Contamination by Solid Particles - ISO 4406**. Suíça, dezembro 1987.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Hydraulic Fluid Power – Fluids – Method for Coding Level of Contamination by Solid Particles - ISO 4406**. Suíça, dezembro 1999.

IOANNIDES, E; JACOBSON, B. Lubricantes Sucios – Menor Duración de los Rodamientos. **La Revista de Rodamientos**. Ed.Esp. p.22-27, 1989.

IOANNIDES, E.; BEGHINI, E.; JACOBSON, B.; BERGLING, G.; WUTTKOWSKI, J.G. Cleanliness and its Importance to Bearing Performance. **Lubrication Engineering**, v.49, n.9, p. 657-663, 1993.

JACOBSON, B. Thin Film Lubrication of Real Surfaces. **Tribology International**, v.33, n.3-4, p.205-210, mar./apr. 2000.

JONES, M.H.; Ferrography Applied to Diesel Engine Oil Analysis. **Wear**, v.56, n.1, p. 93-103, 1979.

JONES, R; Enveloping for Bearing Analysis. **Sound and Vibration** p. 10-15, 1996.

KOMIYA, H. Effect of Contaminant in Lubricant on Noise of Ball Bearings **NLGI Spokesman**, v.56, n.5, p.173-180, aug. 1992.

LASKOWSKI, J. Ferrography Powerful Maintenance Technique. **The Oil & Gas Journal**, v.82, n.45, p.85-92, nov. 1984.

LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica. **Resultados de Análise de Tamanho de Partículas**. Escola Politécnica. Depto. de Engenharia de Minas. Tabela de peneiramento, 2003, Excell

LOCKWOOD, DALLEY **ASM Handbook vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology** ASM International, p. 299 a 312 USA, 1992

LOEWENTHAL, S.H.; MOYER, D.W.; NEEDELMAN, W.M.; Effects of Ultra-Clean and Centrifugal Filtration on Rolling Element Bearing Life. **Journal of Lubrication Technology, ASME Transactions**, v.104, n.3, p. 283-292, jul. 1982.

MASSOUROS, G.P. Normal Vibration of a Plain Bearing Working under Boundary Lubrication Conditions **Tribology International** 33 ,vol.16, n.º5,p. 235238 , out. 1983.

MIETTINEN, J.; ANDERSSON, P. Acoustic Emission of Rolling Bearings Lubricated with Contaminated Grease **Tribology International** 33 , p. 777-787, 2000.

MOFFATT, G.W. , PEARSALL, G.W., WULFF, J. **The structure and properties of materials vol. I Structure** USA:John Willy & Sons, 1964

NEALE, M.J. Mineral Oils, p. 9. In NEALE, M.J. **A Tribology Handbook** Inglaterra: Butterworth Heinemann, 1993.

NEPOMUCENO, L.X. Identificação da Origem das Vibrações. Monitoração. In : NEPOMUCENO, L.X. . **Técnicas de Manutenção Preditiva. Vol.1** . São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1989. p.96-411-498

NIKAS, G.K.; SAYLES, R.S.; IOANNIDES, E. Effects of Debris Particles in Sliding/Rolling Elastohydrodynamic Contacts **Proc. Inst. Mech. Engin. Vol212 parte J** p. 333-343, 1998.

NSK. NSK Bearing Doctor – Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos. p.23 .novembro 2001.

NSK NSK ROLAMENTOS Catálogo Pr B01 2002

NUNNARI, J.J.; DALLEY, R.J. An Overview of Ferrography and its Use in Maintenance. **Tappi Journal**, v.74, n.8. p.85-92, ago. 1991.

OLIVER, W.C.; PHARR, G.M. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. **Journal of Materials Research Society**, v.7, n.6, p. 1564 -1583, jun. 1992.

PARKER Filtration Manual de Filtragem Hidráulica Parker Hannifin Ind. e Com. Ltda. HTM-2 – BR, Brasil

PARDUE, E.F.; PIETY, K.; MOORE, R. Elements of Reliability-Based Machinery Maintenance **Sound and Vibration**, p.14-20, mai. 1992.

PENG, Z.; KESSISSOGLU An Integrated Approach to Fault of Machinery Using Wear Debris and Vibration Analysis (provavel. 2002).

-
- REDA, A.A.; BOWEN, R.; WESTCOTT, V.C. Characteristics of Particles Generated at the Interface Between Sliding Steel Surfaces. **Wear**, v.34, n.3, p.261-273, 1975.
- RONEN, A.; MALKIN, S. Investigation of Friction and Wear of Dynamically Loaded Hydrodynamic Bearings with Abrasive Contaminants. **Journal of Lubrication Technology**. Transactions of the ASME, v.105, n.4, p.559-568, out. 1983.
- ROTH, H.; JOOS, M.F.; DOTTERNHAUSSEN; GEIBEL, W.; Redução de Custo Através da Otimização de Lubrificação do Mancal de Rolamento. **UPTIME Magazine**, v.8. n.2, p.17-20, 2000.
- RUNGE, P.; DUARTE, Cap. 4, p. 31-68. In RUNGE, P.; DUARTE. **Lubrificantes nas Indústrias São Paulo**:Triboncept, 1987.
- SAE RECOMMENDED PRATICE. **Reporting Cleanliness Levels of Hydraulic Fluids – SAE J 1165 JUL 79.**
- SAKURAI, T.; Role os Chemistry in the Lubrication of Concentrated Contacts **Journal of Lubricn Technology**, v.103, n.3, p.473– 485, out. 1981.
- SASAKI, A.; et all. A Study of Hydraulic Valve Problems **Lubricating Engineering**, v.45, n.3, p.140– 46, mar. 1989.
- SCOTT, D. Failure Diagnosis and Investigation. **Tribology**, p. 21-28, fevereiro 1970.
- SCOTT, D.; SEIFERT,W.W.; WESTCOTT, V.C. Ferrography – An Advanced Aid for the 80's. **Wear**, v.34, n.3, p.251-260, 1975.

SCOTT, D. Predictive Maintenance by Ferrography. **Wear**, v.44, n.1, p.173-182, 1977.

SERRIDGE, M. Fault Detection Techniques for Reliable Machine Condition Monitoring **Sound and Vibration**. p.18-22, mai. 1989.

SKF Application Note **What are Enveloping and SEE ?** Application Note CM 3014, SKF Condition Monitoring, Inc. jun 1995

46SKF. Falhas de Rolamentos e Suas Causas – Registro BR 7604 Pb.p.39 . 1988

47SKF INDUSTRIES, INC. A Guide to Better Bearing Lubrication – Reg. N.º 740. USA, novembro 1980, p.2

SMALLMAN, R.E.; BISHOP,R.J. **Metals and Materials: science, processes, applications**. Oxford,UK: Butterworth-Heinemann, 1995. 431p.

SMULDERS, A.J.; KADUSHIN, D. Acoustic Emission Technology: a Viable Predictive Maintenance Tool for the Paper Industry. **Tappi Journal**, v.77, n.12, p.58-64, dez. 1994.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. In: **Fundamentals of Contact Between Solids Engineering Tribology – 2.a edição USA**.Butterworth Heinemann 2001.

STULGYS, P. **Análise de Óleo para Manutenção** São Paulo, KTL Assessoria Consultoria Ltda, 1998

STULGYS, P. **Limpeza de Sistemas Hidráulicos** lubrificação São Paulo, KTL Assessoria Consultoria Ltda, jan 2001

TANDON, N; CHOUDHURY, A. A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. **Tribology International**, v.32, n.8, p.469-480, aug. 1999.

VICKERS. Vickers Guide to Systemic Contamination Control. Michigan, USA: Vickers, 31p. Apostila

VILLE, F. Pollution Solide des Lubrifiants, Indentation et Fatigue des Surfaces. 1998 163 p Tese Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Lyon

WALLIN, E. Inspección Y Entrenimiento Preventivo de los Rodamientos. **La Revista de Rodamientos**, v.146, p.13-29, Reg. 766, 18, 1966.

WISEMAN, M; AH-SUE, A. Monitoring Oil Degradation Using FTIR Analysis **Lubrication Engineering**, v.48, n.3, p.236-241, mar. 1992.

WOWK, V. Typical Vibration Problems. In: WOWK, V. **Machinery Vibration : Measurement and Analysis**. New York, London : McGraw-Hill, 1991. p. 125-234. 358p.

YAMAGUCHI, et all. Investigation of Oil Contamination by Colorimetric Analysis. **Lubrication Engineering**, v.58, n.1, p.12-17, jan. 2002.

YARDLEY, E.D. The Use of Ferrography and Spectrographic Oil Analysis to Monitor the Performance of Three 90 KW Gearboxes. **Wear**, v.56, n.1, p.213-226, 1979.

ZIOGAS, V.I., RAGULSKIS, K.M., RONDONANSKAS, SKURKAITE, O.M.A.. Diagnostics of Ball Bearing Lubrication by High Frequency Vibration Parameters. **Vibratio Engineering**, v.1, p.347-353, 1987.

RELAÇÃO DE ANEXOS

“Pode ir armando o coreto e preparando aquele feijão preto

Eu tô voltando

Põe meia dúzia de Brahma pra gelar, muda a roupa de cama

Eu to voltando

Leva o chinelo pra sala de jantar

Que é lá mesmo que a mala eu vou largar

Quero te abraçar, pode se perfumar

Porque eu to voltando”

Música: TÔ VOLTANDO

Canta: Simone

N.º ANEXO	DESCRIÇÃO
ANEXO 1	Certificado de calibração do Contador de Partículas
ANEXO 2	Resultados de Análise de Tamanho de Partículas - Quartzo – 20 µm
ANEXO 3	Resultados de Análise de Tamanho de Partículas - Quartzo – 75 + 53 µm
ANEXO 4	Certificado de Ensaio de Óleo Lubrificante (ISO VG 32)
ANEXO 5	Registros do Contador de Partículas - Condição “sq”
ANEXO 6	Registros do Contador de Partículas - Condição “sq”
ANEXO 7	Função RMS ALTA e RMS BAIXA para Matlab
ANEXO 8	Registros do Contador de Partículas (óleo filtrado) e condição “3d”
ANEXO 9	Registros do Contador de Partículas - Condições “3d, 7d, 1d”
ANEXO 10	Registros do Contador de Partículas Condições “1d”e “1 a”
ANEXO 11	Registros do Contador de Partículas - Condições “1b, 1c””
ANEXO 12	Registros do Contador de Partículas - Condições “1c, 1d””
ANEXO 13	Registros do Contador de Partículas - Condições “1e, 1f””
ANEXO 14	Registros do Contador de Partículas - Condições “1f”
ANEXO 15	Registros do Rugosímetro – Esferas sem uso
ANEXO 16	Registros do Rugosímetro – Anel Interno sem uso
ANEXO 17	Registros do Rugosímetro – Anel Externo sem uso
ANEXO 18	Registros do Rugosímetro – Esferas após contaminante
ANEXO 19	Registros do Rugosímetro – Anel Interno após contaminante
ANEXO 20	Registros do Rugosímetro – Anel Externo após contaminante

N.º ANEXO	DESCRIÇÃO
ANEXO 21	Relatório de Exames Físico Químicos – Óleo Novo
ANEXO 22	Relatório de Exames Físico Químicos – Óleo de Amaciamento
ANEXO 23	Relatório de Exames Físico Químicos – Óleo sem contaminante
ANEXO 24	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “2c”
ANEXO 25	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “2d”
ANEXO 26	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “2f”
ANEXO 27	Relatório de Exames Ferrográficos – Amostra “2g”
ANEXO 28	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “7c”
ANEXO 29	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “7d”
ANEXO 30	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “7f”
ANEXO 31	Relatório de Exames Ferrográficos – Amostra “7g”

HYDAC INTERNATIONAL

Kalibrier-Zertifikat

Calibration-Certificate / Certificat de Calibrage

Gerät (subject/appareil): **Fluid Control Unit**
(contamination controller/contrôleur de pollution)

Typ (type): **FCU 2110-4**
Seriennr. (serial-no./n° de série): **148G01312**
Sensornr. (sensor-no./n° de la cellule de mesure): **20895**

Das Gerät wurde von der Firma HYDAC FILTERTECHNIK GmbH geprüft und durch Abgleich mit einem Präzisionspartikelzähler kalibriert.

A. m. subject was calibrated and approved at HYDAC FILTERTECHNIK GmbH by comparison with b. m. precision particle counter.

L'appareil a été calibré par la société HYDAC FILTERTECHNIK GmbH par comparaison au compteur de particule de précision.

Partikelzähler (particle counter/compteur de particule)

Typ (type): **PAMAS 3116**
Seriennr. (serial-no./n° de série): **310-3**
Sensor (sensor/cellule de mesure):
Typ (type): **HCB – LD – 25/25**
Seriennr. (serial-no./n° de série): **L-2525-82**
kalibriert in Anlehnung an ISO 4402 am
(calibrated acc. to ISO 4402, date/calibré suivant ISO 4402 le): **04.04.2001**

Die Kalibrierung erfolgte mit der Flüssigkeit:

A. m. subject was calibrated with fluid:

La calibration a été effectuée avec le fluide:

MIL-H-5606, Nato Code H 515

Fabrikat (brand/fournisseur):

Typ (type):

Shell


Aeroshell Fluid 41

Die Durchführung erfolgte nach der Prüfanweisung Nr.: 77 xxx 968 4 1204936 für die Kalibrierung der FCU.

The calibration was executed according to test procedure no.: 77 xxx 968 4 1204936 for calibration of FCU.
Le processus de calibrage s'est déroulé conformément à la procédure de contrôle n° 77 xxx 968 4 1204936, relative au calibrage du FCU.

HYDAC FILTERTECHNIK GmbH
Industriegebiet
D-66280 Sulzbach-Neuweiler

07.12.2001
Datum(date)


.....
Prüfer (signature)
(Responsable du processus de calibrage)



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica - LCT
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-900 São Paulo - SP e-mail: lct@poli.usp.br
TEL: (0XX11) 3091-5151, 3091-5551 e 3091-5787 FAX (0XX11) 3815-5785

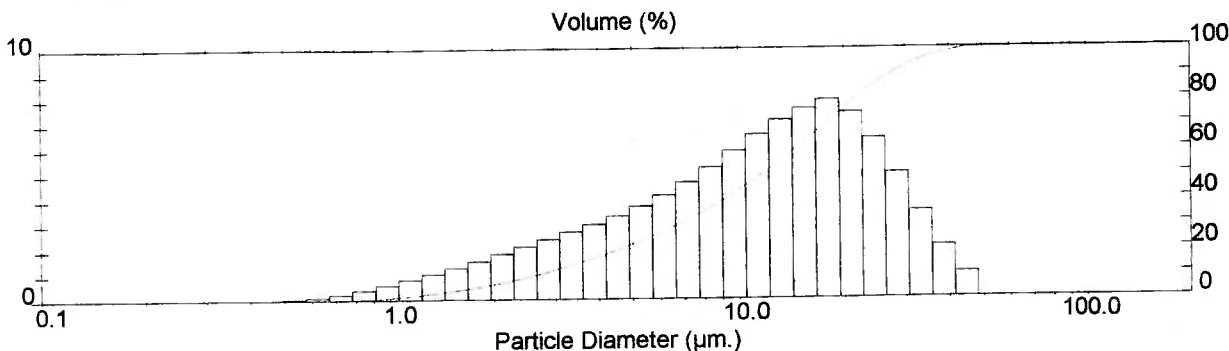
RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra		
Histórico: Certificado: 536/03	Run Number: 15	Medida:
Arquivo: 536	Record Number: 25	Análise: Fri 8 de Aug de 2003 15:25
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\2003\		Fonte de Resultados: Média
Notas: AMOSTRA: Quartzo -20 micron		
CLIENTE: FUNDAÇÃO CAPES/ LINILSON R. PADOVESE		
Meio de Dispersão: álcool isopropílico		
Veloc. bomba: 2500 rpm		

Detalhes do Sistema		
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]
Analysis Model: Polydisperse		Obscuration: 16.1 %
Modifications: None		Residual: 0.758 %

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração= 0.0130 %Vol	Densidade= 2.650 g / cub. cm	Área Superf. Espec.= 0.3667 sq. m / g
Diâmetros Médios:	D (v, 0.1) = 2.62 µm	D (v, 0.5) = 11.71 µm	D (v, 0.9) = 27.42 µm
D [4, 3] = 13.61 µm	D [3, 2] = 6.17 µm	Span = 2.118E+00	Uniformidade = 6.633E-01

Diâm. Inferior (µm)	No Intervalo %	Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %	Diâm. Inferior (µm)	No Intervalo %	Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	4.67	7.72	34.13
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	5.27	9.00	39.40
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	5.91	10.48	45.32
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	6.55	12.21	51.87
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	7.13	14.22	59.00
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	7.59	16.57	66.59
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	7.94	19.31	74.53
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	7.43	22.49	81.96
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	6.40	26.20	88.36
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	5.00	30.53	93.36
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	3.49	35.56	96.85
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	2.11	41.43	98.96
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.02	48.27	99.97
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	0.03	56.23	100.00
0.42	0.01	0.49	0.01	56.23	0.00	65.51	100.00
0.49	0.06	0.58	0.07	65.51	0.00	76.32	100.00
0.58	0.13	0.67	0.20	76.32	0.00	88.91	100.00
0.67	0.24	0.78	0.44	88.91	0.00	103.58	100.00
0.78	0.41	0.91	0.85	103.58	0.00	120.67	100.00
0.91	0.61	1.06	1.46	120.67	0.00	140.58	100.00
1.06	0.83	1.24	2.28	140.58	0.00	163.77	100.00
1.24	1.05	1.44	3.34	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	1.29	1.68	4.63	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	1.56	1.95	6.19	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	1.84	2.28	8.03	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	2.12	2.65	10.15	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	2.41	3.09	12.56	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	2.70	3.60	15.25	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	3.00	4.19	18.25	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	3.33	4.88	21.58	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	3.72	5.69	25.30	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	4.16	6.63	29.46	754.23	0.00	878.67	100.00



ANEXO 3 | Resultados de Análise de Tamanho de Partículas - Quartzo - 75 + 53 µm



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica - LCT
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-900 São Paulo - SP e-mail: lct@poli.usp.br
TEL: (0XX11) 3091-5151, 3091-5551 e 3091-5787 FAX (0XX11) 3815-5785

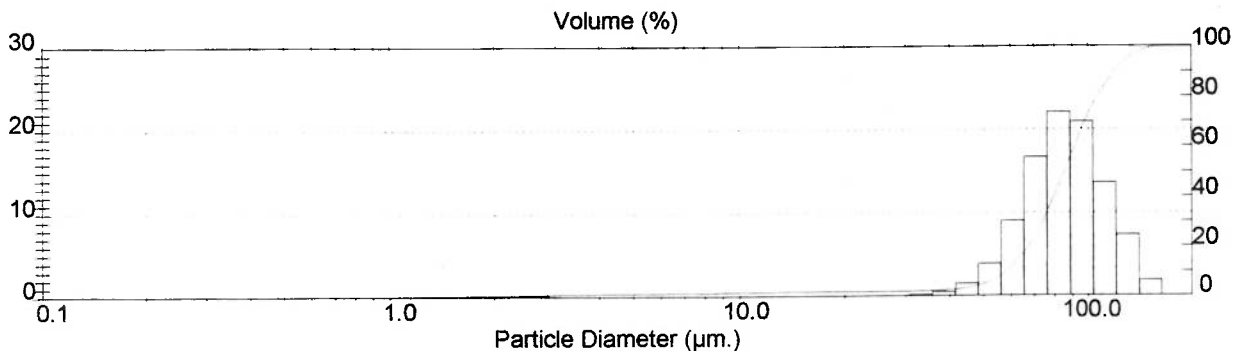
RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra		
Histórico: Certificado: 535/03	Run Number: 14	Medida:
Arquivo: 535	Record Number: 15	Análise: Fri 8 de Aug de 2003 15:12
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\2003\		Fonte de Resultados: Média
Notas: AMOSTRA: Quartzo - 75+53 micron		
CLIENTE: FUNDAÇÃO CAPES/ LINILSON R. PADOVESE		
Meio de Dispersão: álcool isopropílico		
Veloc. bomba: 2500 rpm		

Detalhes do Sistema			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler:	Obscuration: 11.5 %
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.653 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração= 0.0732 %Vol	Densidade= 2.650 g / cub. cm	Área Superf. Espec.= 0.0484 sq. m / g
Diâmetros Médios:	D (v, 0.1) = 58.22 µm	D (v, 0.5) = 85.34 µm	D (v, 0.9) = 119.46 µm
D [4, 3] = 86.41 µm	D [3, 2] = 46.80 µm	Span = 7.176E-01	Uniformidade = 2.313E-01

Diâm. Inferior (µm)	No Intervalo %	Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %	Diâm. Inferior (µm)	No Intervalo %	Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.10	7.72	1.69
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.10	9.00	1.79
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.09	10.48	1.87
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.07	12.21	1.94
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.05	14.22	1.99
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.03	16.57	2.02
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.02	19.31	2.04
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.00	22.49	2.04
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.02	26.20	2.06
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.07	30.53	2.12
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.21	35.56	2.33
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	0.57	41.43	2.90
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.54	48.27	4.45
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	3.88	56.23	8.33
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	9.07	65.51	17.40
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	16.70	76.32	34.10
0.58	0.01	0.67	0.01	76.32	22.04	88.91	56.14
0.67	0.03	0.78	0.04	88.91	20.96	103.58	77.10
0.78	0.05	0.91	0.09	103.58	13.65	120.67	90.75
0.91	0.09	1.06	0.18	120.67	7.35	140.58	98.10
1.06	0.12	1.24	0.31	140.58	1.90	163.77	100.00
1.24	0.14	1.44	0.45	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.15	1.68	0.60	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.16	1.95	0.76	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.17	2.28	0.94	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.16	2.65	1.10	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.13	3.09	1.23	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.10	3.60	1.33	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.07	4.19	1.40	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.05	4.88	1.44	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.06	5.69	1.51	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.08	6.63	1.59	754.23	0.00	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
Serial Number: 33544-299

Prof. Dr. Henrique Kahn
Coordenador do LCT-EPUSP

Dra. M. Manuela M. Lé Tassinari
Pesquisadora do LCT - EPUSP

23 Sep 03 14:22

ANEXO 4	Certificado de Ensaio de Óleo Lubrificante (ISO VG 32)
* * * CERTIFICADO DE ENSAIO * *	N. 9776/03

AGECOM INDUSTRIAS QUIMICAS LTDA.
 Rua Dr. Ulisses Guimaraes, 715, Bairro Bertazzinho
 CEP 09101-970, Maua, SP. Fone e fax : (011) 755-6922

Lote : 02eML/03
 Embalagem : BOMBONA
 Cliente : FUNDACAO CAPES/LINILSON
 Quantidade : 40L
 Produto : AGECOM 140PS = 150 PNL 30 (Ninho 141 150)
 Nota Fiscal : 19010
 Data de Fabricacao : 14/04/03
 Data de Validade : NAO PERFEITVEL

ENSAIOS E RESULTADOS

ENSAIOS	METODO	RESULTADO
Aparencia.....	ISO 4.10-23	LIQ. LIMPIDO
Cor.....	ISO 4.10-02	L 0,5
Corrosao em lamina de Cobre (3hs / 100 oC).	ISO 4.10-11	-
Densidade a 20 / 4 oC.....	ISO 4.10-01	0,8678
Indice de Viscosidade.....	ISO 4.10-13	-
Penetracao 100 o a 25 oC (mm).....	ISO 4.10-08	-
Ponto de Amolecimento (oC).....	ISO 4.10-06	-
Ponto de Anilina (oC).....	ISO 4.10-07	-
Ponto de Gota (oC).....	ISO 4.10-20	-
Ponto de Fulgor (oC).....	ISO 4.10-03	216
Ponto de Combustao (oC).....	ISO 4.10-03	-
Ponto de Fusao Inicial (oC).....	ISO 4.10-19	-
Ponto de Fusao Final (oC).....	ISO 4.10-19	-
Ponto de Fluidez (oC).....	ISO 4.10-24	-
Viscos. Cinem. Liq. Transp. a 40 oC (cSt)..	ISO 4.10-05	29,54
Viscos. Cinem. Liq. Transp. a 100 oC (cSt)..	ISO 4.10-05	- 4,9 a 50
Viscosidade SSU a 50,6 C (SSU).....	ISO 4.10-04	-
Viscosidade CUPO FORD No. 4 / 25 oC (S)....	ISO 4.10-18	-
Umidade.....	ISO 4.10-09	ISENTO
Indice de Acidez.....	ISO 4.10-16	-
TAN (Numero de Acidez total) mg Koh/g.....	ISO 4.10-15	-
Viscos. Cinem. Liq. Opaco a 40 oC (cSt)....	ISO 4.10-17	-
pH da Solucao a _____ %	ISO 4.10-22	-
Brookfield SPIN Nro _____ RPM _____ 25 oC.....	ISO 4.10-21	-

Produto Liberado para Venda

Observacoes :-

Certificado emitido em 13/05/03

Certificado emitido eletronicamente-nao necessaria a assinatura.

Online log: 233
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 13:26
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	08	09	08
	09	08	09
			72

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	274431 414540 08	19
5	127487 140189 09	18
15	8959 12622 08	14
25	3663 3663 09	

Online log: 234
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 13:30
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	08	10	09
			14
			122

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	250879 549756 08	20
5	183295 290877 10	19
15	20351 115982 09	17
25	95231 95231 14	

Online log: 235
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 13:32
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	08	09	08
			09
			118

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	192511 290332 08	19
5	89087 97821 09	17
15	6143 8734 08	14
25	2591 2591 09	

Online log: 236
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 13:34
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	07	09	07
			09
			115

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	157695 237756 07	18
5	73215 80061 09	17
15	4767 6946 07	13
25	2079 2079 09	

Online log: 237
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 13:36
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	07	08	07
			08
			113

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	142335 210996 07	18
5	63231 69661 08	17
15	3775 5430 07	13
25	1655 1655 08	

Online log: 242
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 14:53
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	08	09	07
			09
			110

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	179199 264924 08	19
5	78335 85725 09	17
15	5279 7390 07	13
25	2111 2111 09	

Online log: 243
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 14:56
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	08	08	07
			08
			109

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	178175 243692 08	18
5	60671 65517 08	17
15	3391 4046 07	13
25	1455 1455 08	

Online log: 244
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 14:58
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	08	08	07
			08
			103

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	163039 233068 08	18
5	63487 69229 08	17
15	3951 5742 07	13
25	1791 1791 08	

Online log: 245
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 15:00
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	08	08	07
			08
			102

Last Measurement:

size	counts per 100ml	ISO
µm	diff cum NAS	
2	166911 224564 08	18
5	52991 57653 08	16
15	3199 4662 07	13
25	1463 1463 08	

Online log: 246
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 15:03
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	07	08	06 08 102

last Measurement:

size µm	counts per 100ml			
	diff	cum	NAS	ISO
2	138239	182572	07	18
5	48939	44333	08	16
15	2863	3374	06	12
25	1311	1311	08	

Online log: 247
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 15:05
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	07	08	06 08 102

last Measurement:

size µm	counts per 100ml			
	diff	cum	NAS	ISO
2	129823	172548	07	18
5	39423	43525	08	16
15	2495	4182	06	13
25	1687	1687	08	

Online log: 248
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 15:07
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	07	08	07 09 102

last Measurement:

size µm	counts per 100ml			
	diff	cum	NAS	ISO
2	139263	189188	07	18
5	44543	49917	08	16
15	3167	5374	07	13
25	2287	2287	09	

Online log: 249
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 15:10
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	07	08	06 08 102

last Measurement:

size µm	counts per 100ml			
	diff	cum	NAS	ISO
2	126975	178748	07	18
5	39679	43773	08	16
15	2447	4894	06	13
25	1647	1647	08	

Online log: 250
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 15:12
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	07	08	06 08 102

last Measurement:

size µm	counts per 100ml			
	diff	cum	NAS	ISO
2	116223	156372	07	18
5	35839	48149	08	16
15	2399	4318	06	13
25	1911	1911	08	

Online log: 251
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 09.07.2003 15:14
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	07	07	06 08 102

last Measurement:

size µm	counts per 100ml			
	diff	cum	NAS	ISO
2	102911	131956	07	18
5	26239	29845	07	15
15	1583	2886	06	12
25	1223	1223	08	

ANEXO 7**Função RMS ALTA e RMS BAIXA para Matlab**

```
function [rmsbaixa,rmsalta]=filtra(s);
%[rmsbaixa rmsalta]=filtra(s);
%filtra sinal s passa baixa e passa alta
%rmsbaixa e rmsalta s~ao os valores de RMS para os sinais filtrados passa baixa e
%a frequencia de corte do filtro passa baixa 'e de 1 kHz e do passa alta de 8 kHz

%coeficientes do filtro passa baixa
abaixa = [1.0000  -3.8587   6.0629  -4.8248   1.9389  -0.3131];
bbaixa = [0.0570  -0.1441   0.0897   0.0897  -0.1441   0.0570];
%coeficientes do filtro passa alta
aalta = [1.0000   2.1732   2.3818   1.3334   0.4224   0.0411];
balta = [0.1080   0.0745   0.0947  -0.0947  -0.0745  -0.1080];

rmsbaixa=std(filter(bbaixa,abaixa,s));
rmsalta=std(filter(balta,aalta,s));
```

Online log: 215
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 11:44
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	05	05	04 06 77

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	23935	31678	05	15
5	6879	7743	05	13
15	451	864	04	10
25	413	413	06	

Online log: 216
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 11:47
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	05	05	04 06 77

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	23839	29316	05	15
5	5759	6277	05	13
15	193	518	04	10
25	325	325	06	

Online log: 266
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 10.07.2003 20:50
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	Flow rate error		
0:02	13	14	12 14 81

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	5767167	8416252	13	24
5	2424831	2649885	14	22
15	156671	224254	12	18
25	67583	67583	14	

Online log: 267
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 10.07.2003 20:56
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	13	14	12 14 81

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	5701631	8469500	13	24
5	2523135	2767869	14	22
15	173835	244734	12	18
25	71679	71679	14	

Online log: 268
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 10.07.2003 20:59
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	12	13	12 13 80

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	4628287	6700796	12	23
5	1884159	2888309	13	22
15	132215	196350	12	18
25	59135	59135	13	

Online log: 269
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 10.07.2003 21:26
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	12	13	12 13 78

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	5111887	6987644	12	23
5	1662975	1795837	13	21
15	98383	132862	12	18
25	34559	34559	13	

Online log: 270
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 10.07.2003 21:29
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	12	13	11 12 78

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	4882431	6332156	12	23
5	1343487	1449725	13	21
15	78335	106238	11	17
25	27983	27983	12	

Online log: 271
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 10.07.2003 21:45
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	12	12	10 11 77

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	4423679	5278944	12	23
5	802815	847165	12	20
15	32383	44390	10	16
25	11967	11967	11	

Online log: 272
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 10.07.2003 21:53
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m 02...05...15...25	>25	ml	
0:00	12	12	10 11 77

last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NAS ISO

2	4227871	4997628	12	23
5	733183	778557	12	20
15	27519	37374	10	16
25	9655	9655	11	

Online log: 273
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 18.07.2003 21:55
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	12	12	09 11 70

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	3768319	4418620	12	23
5	618495	650301	12	20
15	22783	31806	09	15
25	9023	9023	11	

Online log: 274
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 18.07.2003 22:17
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	12	12	13 15 72

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	2736127	4066300	12	23
5	901119	1330173	12	21
15	242687	429054	13	19
25	186367	186367	15	

Online log: 276
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 18.07.2003 22:23
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	13	15	13 14 78

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	7897087	14404604	13	24
5	6225919	6507517	15	23
15	211967	201590	13	19
25	69631	69631	14	

Online log: 277
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 18.07.2003 22:33
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	13	15	13 14 74

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	7536639	12160508	13	24
5	4292607	4623869	15	23
15	226303	331262	13	19
25	104959	104959	14	

Online log: 278
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 18.07.2003 22:36
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	13	14	12 13 76

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	8290303	12105212	13	24
5	3653631	3814909	14	22
15	121343	161278	12	18
25	39935	39935	13	

Online log: 279
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 18.07.2003 22:49
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	13	14	12 13 74

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	8355839	11428348	13	24
5	2932735	3072509	14	22
15	98303	139774	12	18
25	41471	41471	13	

Online log: 280
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 18.07.2003 22:52
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	13	14	11 12 75

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	7995391	10375036	13	24
5	2277375	2379645	14	22
15	74751	102270	11	17
25	27519	27519	12	

Online log: 314
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 04:42
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	10	11	10 15 118

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	987135	1635068	10	21
5	475135	647933	11	20
15	39679	172790	10	18
25	133119	133119	15	

Online log: 315
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 04:45
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...15...25	>25 ml
0:00	10	11	09 11 117

Last Measurement:
size counts per 100ml
 μm diff cum NAS ISO

2	1064959	1509692	10	21
5	411647	444733	11	19
15	22143	33006	09	16
25	10943	10943	11	

Online log: 316
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 04:49
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	10	11	09 11 115

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	1138687	1541436	10	21		
5	374783	482749	11	19		
15	19711	27966	09	15		
25	8255	8255	11			

Online log: 317
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 04:52
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	10	11	09 10 114

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	1003519	1332188	10	21		
5	385151	328669	11	19		
15	16511	23518	09	15		
25	7887	7887	10			

Online log: 318
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 04:59
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	11	11	10 11 115

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	1687551	2283516	11	22		
5	475135	515965	11	20		
15	27135	48830	10	16		
25	13695	13695	11			

Online log: 295
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 02:32
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	<02	15	15 >15 115

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	0	8613885	<02	24		
5	6356991	8613885	15	>23		
15	1489823	2256894	15	>21		
25	847871	847871	>15			

Online log: 297
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 02:37
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	<02	<02	12 >15 113

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	0	2598910	<02	22		
5	0	2598910	<02	22		
15	174879	2598910	12	>21		
25	2424831	2424831	>15			

Online log: 298
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 02:43
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	<02	<02	>15 >15 113

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	0	3653630	<02	22		
5	0	3653630	<02	22		
15	1712127	3653630	>15	>21		
25	1941583	1941583	>15			

Online log: 299
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 02:46
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	<02	>15	>15 >15 112

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	0	14368765	<02	24		
5	11738943	14368765	>15	>23		
15	1794047	2637822	>15	>21		
25	843775	843775	>15			

Online log: 300
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 02:52
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	<02	15	15 >15 115

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	0	8832253	<02	24		
5	6829311	8832253	15	>23		
15	1294335	2882942	15	>21		
25	788687	788687	>15			

Online log: 301
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 02:54
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	<02	>15	15 >15 113

last Measurement:

size	counts per 100ml	µm	diff	cum	NAS	ISO
2	0	16674813	<02	24		
5	15532831	16674813	>15	>23		
15	868159	1142782	15	21		
25	282623	282623	>15			

Online log: 382
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:17
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	11	13	11 13 113

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	1662975	2999004	11	22
5	1220607	1336829	13	21
15	81919	116222	11	17
25	34303	34303	13	

Online log: 383
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:21
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	09	11	10 12 113

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	460799	883196	09	20
5	368639	422397	11	19
15	36863	53758	10	16
25	16895	16895	12	

Online log: 384
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:28
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	10	11	10 11 113

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	929791	1433724	10	21
5	462047	503933	11	20
15	28671	41006	10	16
25	12415	12415	11	

Online log: 385
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:30
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	12	13	10 10 111

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	2981887	4074876	12	23
5	1056767	1092909	13	21
15	28159	36222	10	16
25	8063	8063	10	

Online log: 386
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:35
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	12	12	09 10 113

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	2621439	3297020	12	22
5	647167	673081	12	20
15	20991	28414	09	15
25	7423	7423	10	

Online log: 387
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:38
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	10	12	13 15 93

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	978943	2199548	10	22
5	712703	1220605	12	21
15	258047	507902	13	20
25	249855	249855	15	

Online log: 388
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:00
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	07	10	09 14 122

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	154623	451500	07	19
5	177151	296957	10	19
15	20479	119006	09	17
25	99327	99327	14	

Online log: 389
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:02
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	08	10	09 10 119

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	231423	411932	08	19
5	163839	180509	10	18
15	11711	16670	09	15
25	4959	4959	10	

Online log: 318
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:10
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	10	10	09 14 120

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	733183	1005308	10	21
5	226303	352125	10	19
15	21375	125022	09	17
25	104447	104447	14	

Online log: 311
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:12
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	11	10	08 09 118

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	1343487	1568300	11	21
5	205823	216813	10	18
15	7647	10990	08	14
25	3343	3343	09	

Online log: 312
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:16
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	10	10	07 09 117

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	1228799	1403788	10	21
5	166911	174989	10	18
15	5343	8078	07	14
25	2735	2735	09	

Online log: 313
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:18
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	11	10	07 09 115

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	1441791	1636204	11	21
5	187391	194413	10	18
15	4767	7822	07	13
25	2255	2255	09	

Online log: 314
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:42
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	10	11	10 15 118

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	987135	1635868	10	21
5	475135	647933	11	20
15	39629	172798	10	18
25	133119	133119	15	

Online log: 315
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:45
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	10	11	09 11 117

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	1064959	1589692	10	21
5	411647	444733	11	19
15	22143	33006	09	16
25	10943	10943	11	

Online log: 316
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:49
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	10	11	09 11 115

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	1138687	1541436	10	21
5	374783	482749	11	19
15	19711	27966	09	15
25	8255	8255	11	

Online log: 317
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:52
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	10	11	09 10 114

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	1003519	1332108	10	21
5	385151	328669	11	19
15	16511	23518	09	15
25	7807	7807	10	

Online log: 318
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:59
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	11	11	10 11 115

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	1687551	2263516	11	22
5	475135	515965	11	20
15	27135	48030	10	16
25	13695	13695	11	

Online log: 319
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	11	12	10 11 114

last Measurement:

size	counts per 100ml			
μm	diff	cum	NAS	ISO
2	1802239	2435644	11	22
5	581631	633405	12	20
15	36351	51774	10	16
25	15423	15423	11	

Online log: 320
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:13
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	12	13	12 14 113

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	3620863	5790716	12	23
5	1941503	2169653	13	22
15	143359	228350	12	18
25	84991	84991	14	

Online log: 323
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:31
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	13	14	12 15 116

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	6062079	9042428	13	24
5	2670591	2980349	14	22
15	189055	309758	12	19
25	200703	200703	15	

Online log: 326
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:55
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	13	14	12 14 113

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	6029311	10024444	13	24
5	3768319	3995133	14	22
15	137215	226814	12	18
25	89599	89599	14	

Online log: 321
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:15
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	12	13	12 14 113

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	4079615	6206844	12	23
5	2087039	2207229	13	22
15	132095	200190	12	18
25	68095	68095	14	

Online log: 324
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:37
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	Flow rate error		
0:01	13	14	12 13 116

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	6520831	9615356	13	24
5	2949119	3094525	14	22
15	97791	145406	12	18
25	47615	47615	13	

Online log: 327
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:58
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	13	15	13 14 113

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	5242879	11086844	13	24
5	5570559	5843965	15	23
15	190463	273406	13	19
25	82943	82943	14	

Online log: 322
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:24
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	13	14	12 15 112

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	5963775	10019836	13	24
5	3751935	4056061	14	23
15	153599	304126	12	19
25	150527	150527	15	

Online log: 325
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:41
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	13	14	12 13 115

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	6422527	9951740	13	24
5	3391487	3529213	14	22
15	96767	137726	12	18
25	40959	40959	13	

Online log: 328
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 06:05
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...	05...	15...25 >25 ml
0:00	12	>15	13 14 115

last Measurement:
size counts per 100ml

µm	diff	cum	NAS	ISO
2	2949119	12941820	12	24
5	9633791	9992701	>15	>23
15	261119	358910	13	19
25	97791	97791	14	

Online log: 329
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 06:09
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	12	>15	13 14 114

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	2654207	13191164	12	24
5	10158079	10536957	>15	>23
15	270335	378878	13	19
25	108543	108543	14	

Online log: 330
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 06:17
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	11	>15	13 14 115

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	1400831	14157308	11	24
5	12320767	12756477	>15	>23
15	319487	435710	13	19
25	116223	116223	14	

Online log: 332
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 06:33
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time	NAS	1638	Q
h:m	02...05...15...25	>25	ml
0:00	<02	>15	14 15 113

last Measurement:

size	counts per 100ml			
µm	diff	cum	NAS	ISO
2	0	17100797	<02	24
5	16515071	17100797	>15	>23
15	450559	585726	14	20
25	135167	135167	15	

Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:00:46
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λ c=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.0507 μ m
 Rz : 0.1300 μ m
 Rp : 0.0900 μ m
 Rv : 0.0400 μ m
 Rt : 0.2500 μ m
 RSm : 0.0157mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 → 5.000 μ m/10mm
 H 200 ↓ 0.050mm /10mm

Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:06:43
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λ c=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.0461 μ m
 Rz : 0.1300 μ m
 Rp : 0.0900 μ m
 Rv : 0.0400 μ m
 Rt : 0.2500 μ m
 RSm : 0.0028mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 → 5.000 μ m/10mm
 H 200 ↓ 0.050mm /10mm

Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:04:40
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λ c=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.0273 μ m
 Rz : 0.0570 μ m
 Rp : 0.0510 μ m
 Rv : 0.0050 μ m
 Rt : 0.0800 μ m
 RSm : 0.0000mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 → 5.000 μ m/10mm
 H 200 ↓ 0.050mm /10mm

Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:08:32
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λ c=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.0279 μ m
 Rz : 0.0930 μ m
 Rp : 0.0560 μ m
 Rv : 0.0370 μ m
 Rt : 0.1600 μ m
 RSm : 0.0062mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 → 5.000 μ m/10mm
 H 200 ↓ 0.050mm /10mm

Surfcorder SE1700 α

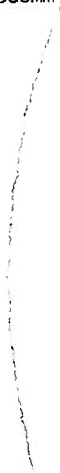
DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:26:45
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : IS097/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080mm$
 Length : 0.320mm

[IS097/JIS2001]

Ra : 0.0411 μm
 Rz : 0.2425 μm
 Rp : 0.0813 μm
 Rv : 0.1613 μm
 Rt : 0.3250 μm
 RSm : 0.0199mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 \rightarrow 5.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:19:11
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : IS097/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080mm$
 Length : 0.400mm

[IS097/JIS2001]

Ra : 0.0404 μm
 Rz : 0.2330 μm
 Rp : 0.0740 μm
 Rv : 0.1590 μm
 Rt : 0.3050 μm
 RSm : 0.0158mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 \rightarrow 5.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:26:04
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : IS097/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080mm$
 Length : 0.240mm

[IS097/JIS2001]

Ra : 0.0433 μm
 Rz : 0.2367 μm
 Rp : 0.1050 μm
 Rv : 0.1317 μm
 Rt : 0.3150 μm
 RSm : 0.0242mm

P Profile(GAUSS)

V 5000 \rightarrow 2.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:13:11
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080$ mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.0760 μ m
 Rz : 0.7150 μ m
 Rp : 0.4070 μ m
 Rv : 0.3080 μ m
 Rt : 2.130 μ m
 RSm : 0.0170mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 \rightarrow 5.000 μ m/10mm
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm

Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:15:55
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080$ mm
 Length : 0.320mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.0743 μ m
 Rz : 0.4913 μ m
 Rp : 0.1450 μ m
 Rv : 0.3463 μ m
 Rt : 1.095 μ m
 RSm : 0.0380mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 \rightarrow 5.000 μ m/10mm
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm



esfera / quartzo

esfera / quartzo 2

Esferas de mesmo tamanho
de aço / quartzo 3

esfera / quartzo 4

Surfcorder SE1700 α

Surfcorder SE1700 α

Surfcorder SE1700 α

Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
TIME : 17:49:34
M speed : 0.050mm/s
Standards : ISO97/JIS2001
Cut off : λc=0.080mm
Length : 0.400mm

DATE : Aug 29, 2003
TIME : 17:53:23
M speed : 0.050mm/s
Standards : ISO97/JIS2001
Cut off : λc=0.080mm
Length : 0.400mm

DATE : Aug 29, 2003
TIME : 17:55:50
M speed : 0.050mm/s
Standards : ISO97/JIS2001
Cut off : λc=0.080mm
Length : 0.400mm

DATE : Aug 29, 2003
TIME : 17:58:09
M speed : 0.050mm/s
Standards : ISO97/JIS2001
Cut off : λc=0.080mm
Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

[ISO97/JIS2001]

[ISO97/JIS2001]

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.2022 μm
Rz : 1.260 μm
Rp : 0.4200 μm
Rv : 0.8400 μm
Rt : 2.700 μm
RSm : 0.0259mm

Ra : 0.1343 μm
Rz : 0.7510 μm
Rp : 0.2550 μm
Rv : 0.4960 μm
Rt : 1.075 μm
RSm : 0.0551mm

Ra : 0.1273 μm
Rz : 0.8700 μm
Rp : 0.2900 μm
Rv : 0.5800 μm
Rt : 2.050 μm
RSm : 0.0395mm

Ra : 0.1277 μm
Rz : 0.6700 μm
Rp : 0.2900 μm
Rv : 0.3800 μm
Rt : 0.9500 μm
RSm : 0.0258mm

P Profile(GAUSS)

P Profile(GAUSS)

P Profile(GAUSS)

P Profile(GAUSS)

V 2000 → 5.000 μm/10mm
H 200 ↓ 0.050mm /10mm

V 2000 → 5.000 μm/10mm
H 200 ↓ 0.050mm /10mm

V 2000 → 5.000 μm/10mm
H 200 ↓ 0.050mm /10mm

V 2000 → 5.000 μm/10mm
H 200 ↓ 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:29:51
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λ c=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.1499 μ m
 Rz : 0.8110 μ m
 Rp : 0.2530 μ m
 Rv : 0.5580 μ m
 Rt : 1.525 μ m
 RSm : 0.0213mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 → 5.000 μ m/10mm
 H 200 ↓ 0.050mm /10mm



Surfcorder SE 1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:31:35
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λ c=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.1615 μ m
 Rz : 0.8670 μ m
 Rp : 0.2470 μ m
 Rv : 0.6200 μ m
 Rt : 1.235 μ m
 RSm : 0.0264mm

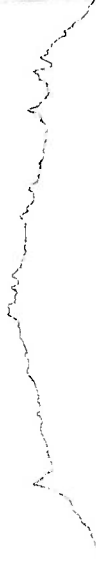
P Profile(GAUSS)
 V 2000 → 5.000 μ m/10mm
 H 200 ↓ 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:33:29
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λ c=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.1914 μ m
 Rz : 1.099 μ m
 Rp : 0.2970 μ m
 Rv : 0.8020 μ m
 Rt : 2.040 μ m
 RSm : 0.0233mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 → 5.000 μ m/10mm
 H 200 ↓ 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:35:11
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λ c=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.2189 μ m
 Rz : 0.9710 μ m
 Rp : 0.3720 μ m
 Rv : 0.5990 μ m
 Rt : 1.635 μ m
 RSm : 0.0319mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 → 5.000 μ m/10mm
 H 200 ↓ 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:37:01
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080mm$
 Length : 0.320mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.2294 μm
 Rz : 1.310 μm
 Rp : 0.4350 μm
 Rv : 0.8750 μm
 Rt : 1.740 μm
 RSm : 0.0329mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 \rightarrow 5.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:38:18
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080mm$
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.1069 μm
 Rz : 0.5340 μm
 Rp : 0.1740 μm
 Rv : 0.3600 μm
 Rt : 0.7400 μm
 RSm : 0.0258mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 \rightarrow 5.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:40:41
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080mm$
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.2012 μm
 Rz : 1.089 μm
 Rp : 0.3690 μm
 Rv : 0.7200 μm
 Rt : 1.570 μm
 RSm : 0.0333mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 \rightarrow 5.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm



Surfcorder SE1700 α

DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:35:23
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda c=0.080mm$
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]

Ra : 0.1308 μm
 Rz : 0.7100 μm
 Rp : 0.2700 μm
 Rv : 0.4400 μm
 Rt : 0.8500 μm
 RSm : 0.0186mm

P Profile(GAUSS)

V 2000 \rightarrow 5.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \downarrow 0.050mm /10mm



**RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 132**

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 12/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

Data do exame: 25/09/2003

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

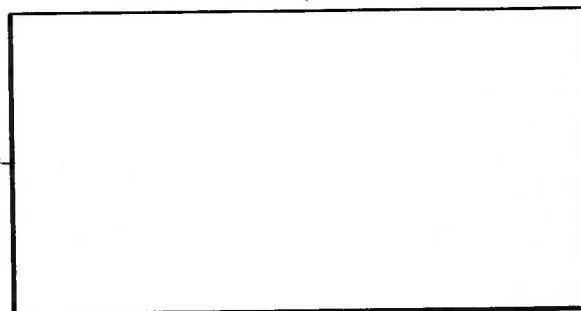
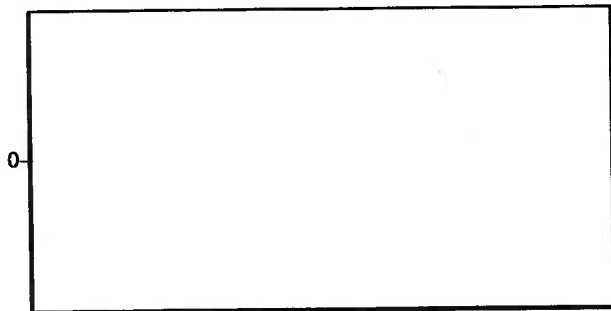
Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

NEUTRO LEVE - NOVO

Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00

00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: NEUTRO LEVE - NOVO

Resultados espectrométricos: Fe= 0ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 0ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

**RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 134**

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 11/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

2° coleta do dia neste ponto

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

Data do exame: 25/09/2003

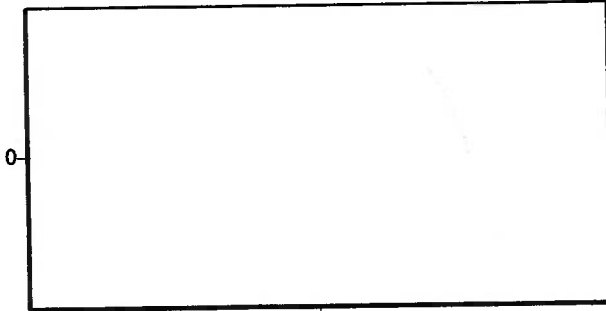
Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

ÓLEO DE RUNNING INN

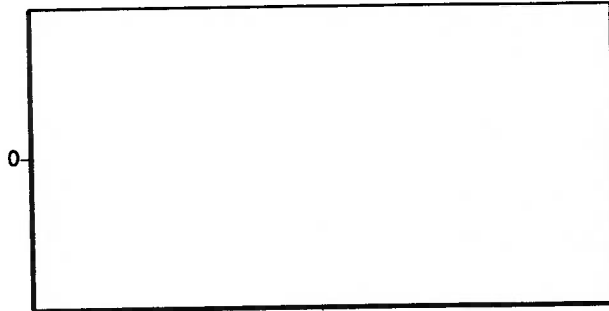
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.
 * O cliente informa: ÓLEO DE RUNNING INN

Resultados espectrométricos: Fe= 0ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 0ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Nota: os resultados espectrométricos são arredondados
 para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.



Tribolab

RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 133

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 11/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

Data do exame: 25/09/2003

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

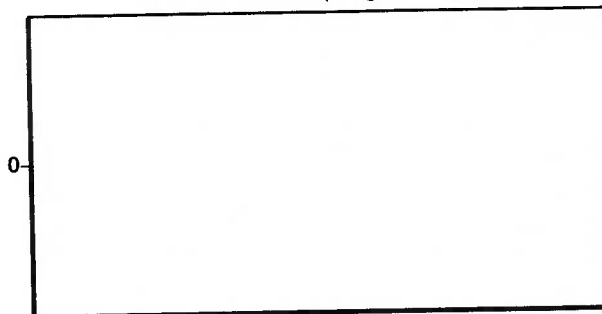
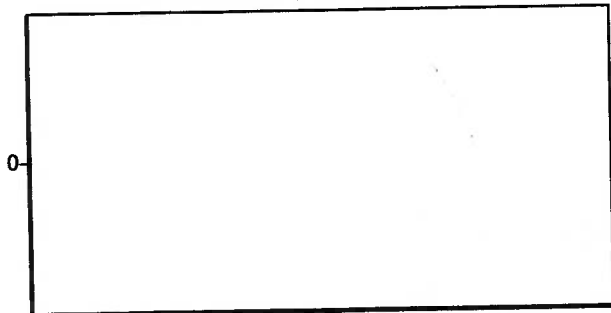
Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

Amostra sq

Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00

00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.
 * O cliente informa: Amostra sq. Contaminantes: Nenhum.

Resultados espectrométricos: Fe= 0ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 0ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

**RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 135**

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 11/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

3º coleta do dia neste ponto

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

Data do exame: 25/09/2003

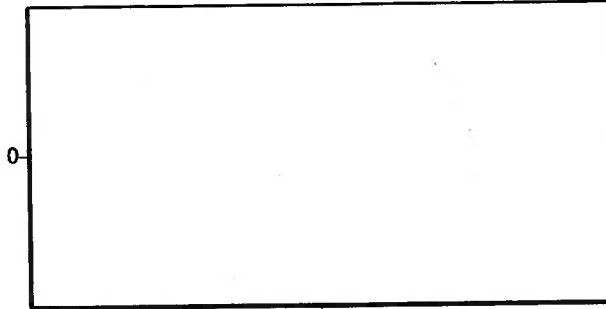
Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

Amostra 2c

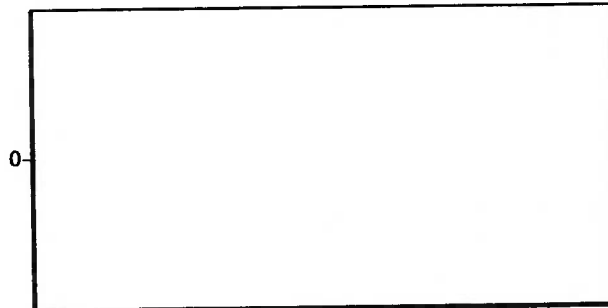
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.
 * O cliente informa: Amostra 2c. Contaminantes: Quartzo 20 - 0µ. Concentração Adicionada: 0,10 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 1ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 1ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 2ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 1ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

**RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 136**

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 11/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

4° coleta do dia neste ponto

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

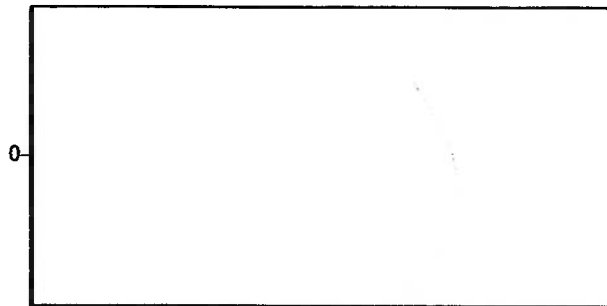
Data do exame: 25/09/2003

Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

Amostra 2d

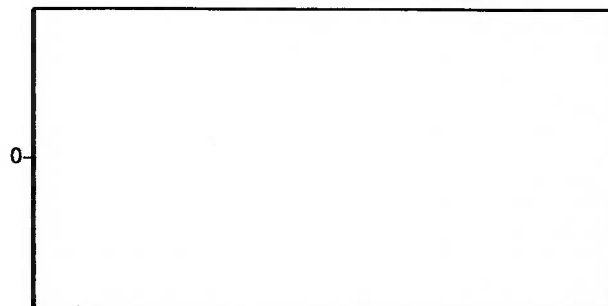
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)



00/00

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 2d. Contaminantes: Quartzo 20 - 0µ. Concentração Adicionada: 1 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 2ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 1ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 5ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

**RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 137**

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 11/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE

5° coleta do dia neste ponto

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

Data do exame: 25/09/2003

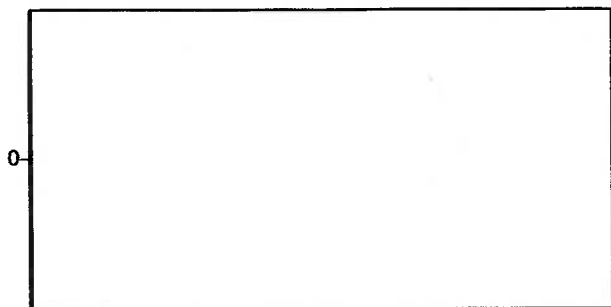
Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

Amostra 2f

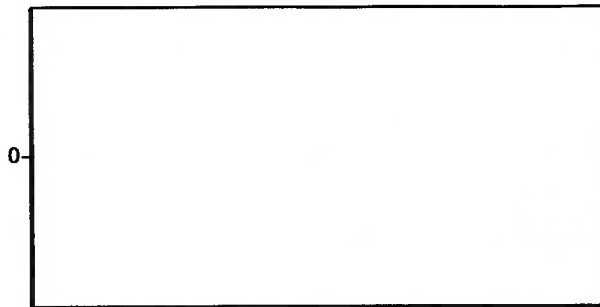
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 2f. Contaminantes: Quartzo 20 - 0µ. Concentração Adicionada: 5 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 12ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 2ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 64ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.



Tribolab

RELATÓRIO DE EXAME FERROGRÁFICO 309 - 138

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

INDEFINIDA

Data da coleta: 11/08/2003

6ª coleta do dia neste ponto

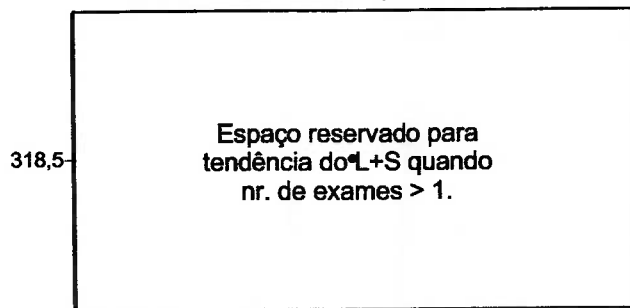
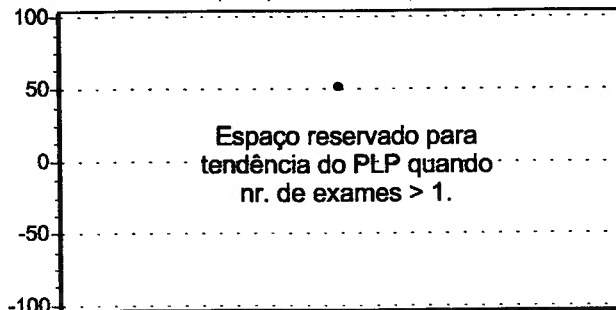
Data do exame: 25/09/2003

CONCLUSÕES: Ref.:Amostra 2g Lub:NEUTRO LEVE ISO-32 []Normal []Aceitável []Alerta [] Crítica
 Há sinais claros de desgaste do rolamento com pequeno rompimento de filme lubrificante.

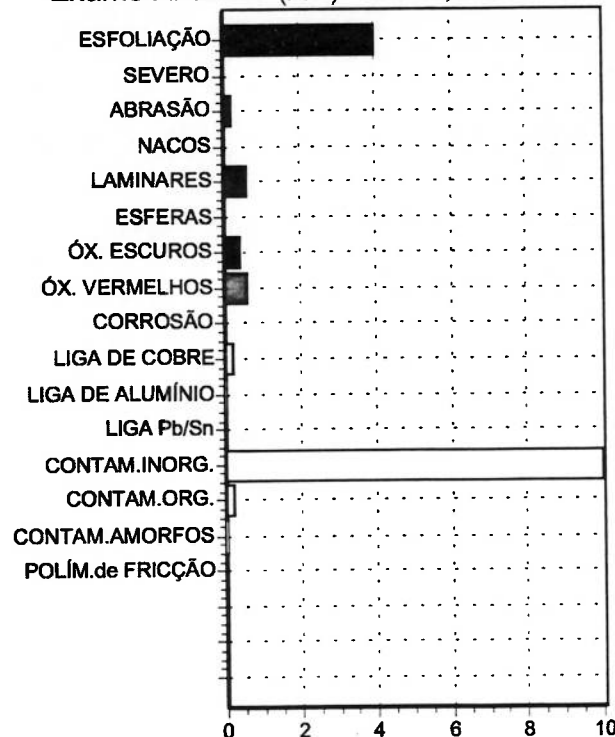
Resultados ferrográficos em unidades próprias da técnica, não passíveis de conversão direta por técnicas tradicionais. L = partículas maiores que 5µm, S = partículas menores que 5µm.

L = 239,5 S = 79 L+S = 318,5 PLP = 50,4 Visc. não foi medida. Teste de água =

Exame Quantitativo (DR) : L+S

Exame Quant. (DR): $PLP = [(L-S)/(L+S)]100$ 

Exame Analítico (AN): Vol.=0,3ml

**INFORMAÇÕES ENVIADAS PELO CLIENTE / OBSERVAÇÕES REALIZADAS NO EXAME:**

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 2g. Contaminantes: Quartzo 20 - 0µm. Concentração Adicionada: 10 g / l.

Resultados espectrométricos:Fe= 23ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 1ppm, Sn= 0ppm, Al= 5ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 128ppm, B= 1ppm, Na= 1ppm, Mg= 1ppm,Ca= 1ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Valores arredondados para o próximo inteiro (ASTM-D6595-00).

O ensaio ferrográfico quantitativo foi utilizado para dimensionamento do corpo de prova da ferrografia analítica. Pela ferrografia analítica foi possível identificar significativa presença de partículas ferrosas geradas por esfoliação com dimensão média de 6µm, pequenos sinais de pitting incipiente (partículas laminares de até 30µm), sinais de rompimento de filme (óxidos de ferro) e abrasão causada pela grande quantidade de contaminantes. Os cristais de quartzo apresentaram-se com dimensão média de 20µm.

Laboratório ferrográfico da Tribolab - SP

Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni

**RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 139**

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 11/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

7º coleta do dia neste ponto

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

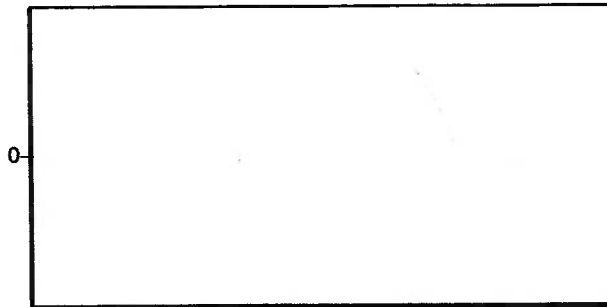
Data do exame: 25/09/2003

Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

Amostra 7c

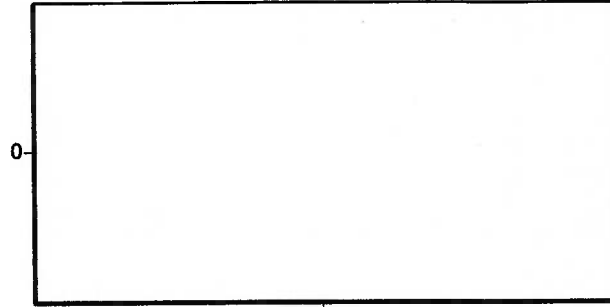
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)



00/00

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 7c. Contaminantes: Quartzo 74 a 53µ. Concentração Adicionada: 0,10 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 5ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 1ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 10ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

**RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 140**

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 11/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

8° coleta do dia neste ponto

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

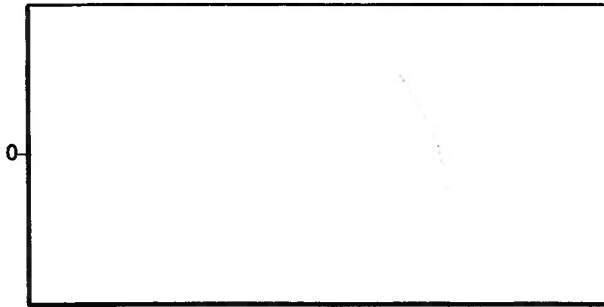
Data do exame: 25/09/2003

Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

Amostra 7d

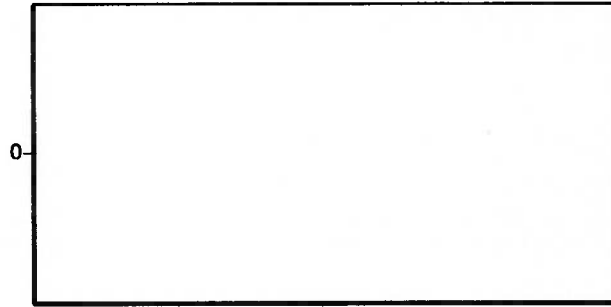
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)



00/00

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 7d. Contaminantes: Quartzo 74 a 53µ. Concentração Adicionada: 1 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 9ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 11ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.



Tribolab

RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 141

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Data da coleta: 11/08/2003

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

9ª coleta do dia neste ponto

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

Data do exame: 25/09/2003

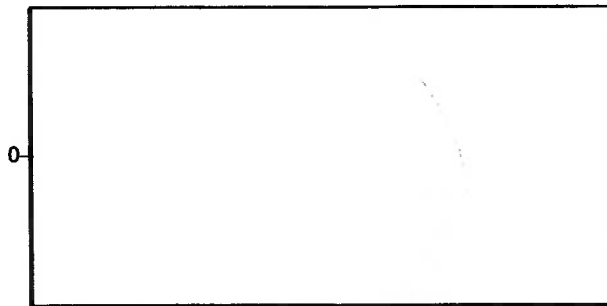
Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

Amostra 7f

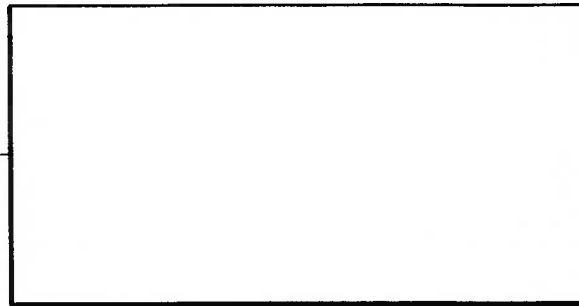
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 7f. Contaminantes: Quartzo 74 a 53µ. Concentração Adicionada: 5 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 30ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 29ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.



RELATÓRIO DE EXAME FERROGRÁFICO 309 - 142

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Máquina..... MESTRADO M. ATTILIO - BANCO DE TESTE

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

INDEFINIDA

Data da coleta: 11/08/2003

10° coleta do dia neste ponto

Data do exame: 25/09/2003

CONCLUSÕES: Ref.:Amostra 7g Lub:NEUTRO LEVE ISO-32 []Normal []Aceitável []Alerta [] Crítica

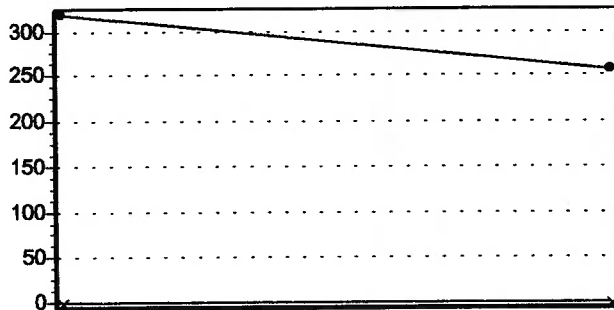
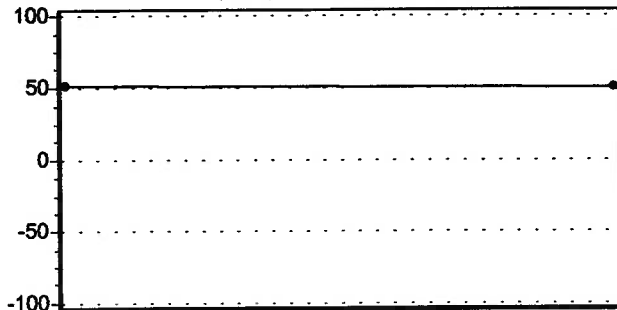
Os resultados são assemelhados aos obtidos na amostra 2g, porém com maior incidência de partículas.

É razoável supor que inspeção dos componentes do rolamento indiquem presença muito pequena de pitting, ainda não comprometedora. Não tendo sido encontrados sinais de falha iminente, numa máquina industrial comum, a recomendação seria limpar o compartimento para proteção dos componentes e prosseguir com o monitoramento.

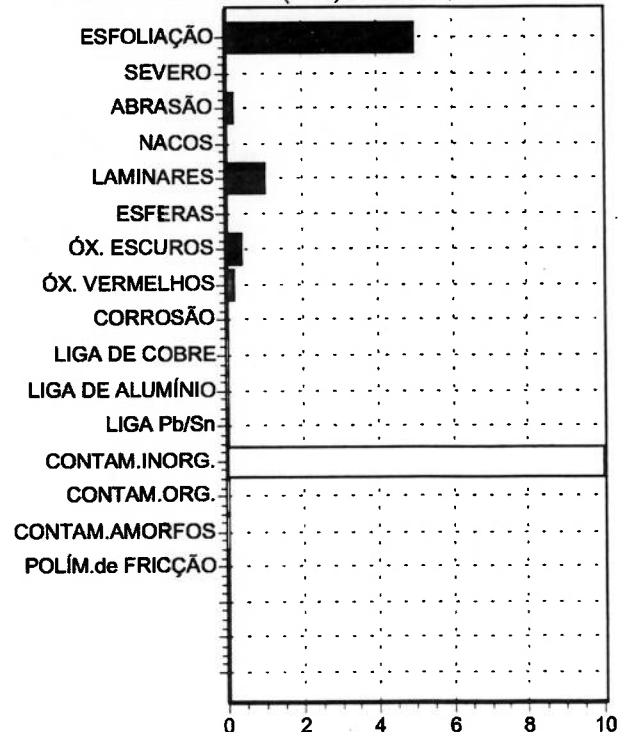
Resultados ferrográficos em unidades próprias da técnica, não passíveis de conversão direta por técnicas tradicionais. L = partículas maiores que 5µm, S = partículas menores que 5µm.

L = 192 S = 65 L+S = 257 PLP = 49,4 Visc. não foi medida. Teste de água =

Exame Quantitativo (DR) : L+S

Exame Quant. (DR): $PLP = [(L-S)/(L+S)]100$ 

Exame Analítico (AN): Vol.=0,3ml



INFORMAÇÕES ENVIADAS PELO CLIENTE / OBSERVAÇÕES REALIZADAS NO EXAME:

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 7g. Contaminantes: Quartzo 74 a 53µm. Concentração Adicionada: 10 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 53ppm, Cr= 1ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 1ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 55ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Valores arredondados para o próximo inteiro (ASTM-D6595-00). O ensaio ferrográfico quantitativo foi utilizado para dimensionamento do corpo de prova da ferrografia analítica. A ferrografia analítica revelou praticamente o mesmo tipo de partículas encontrado na amostra 2G. Observaram-se maior presença de esfoliação (tamanho médio de 6µm) e ligeiramente maior presença de partículas laminares de pitting incipiente (< 20µm). Os mesmos pequenos sinais de rompimento de filme foi acusado pela presença de óxidos de ferro. Os cristais de quartzo mostraram-se com dimensão média de 25µm, sugerindo cominuição.

Laboratório ferrográfico da Tribolab - SP

Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni